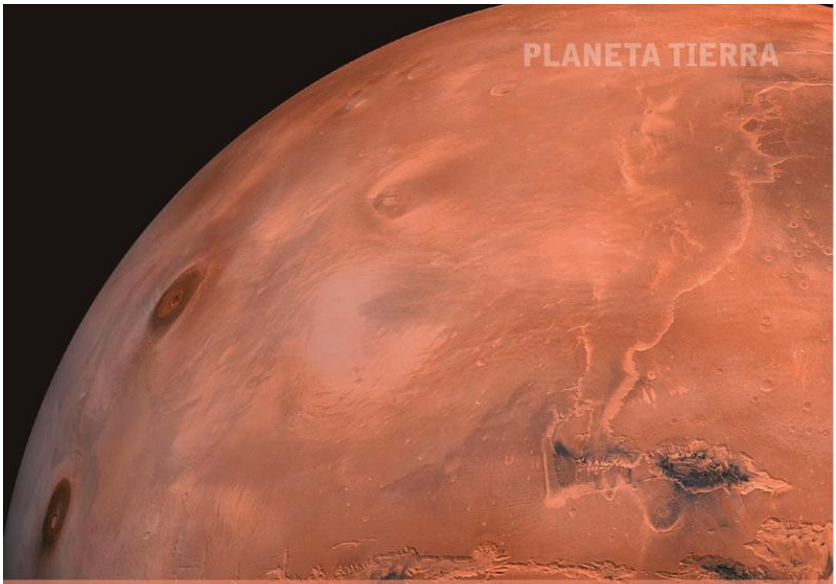


PLANETA TIERRA

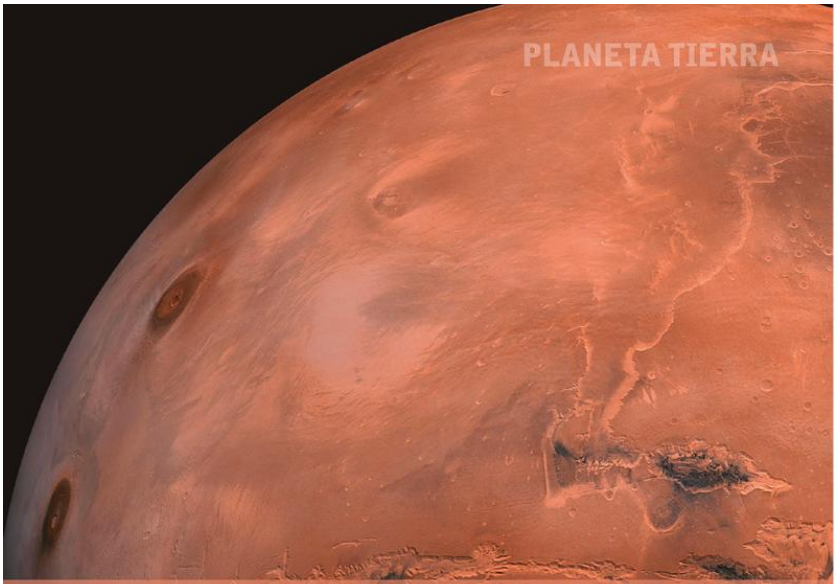
GEOLOGÍA DE MARTE

Eulogio Pardo Igúzquiza
y Juan José Durán Valsero

Un planeta fósil

Instituto Geológico y Minero de España

CATARATA



PLANETA TIERRA

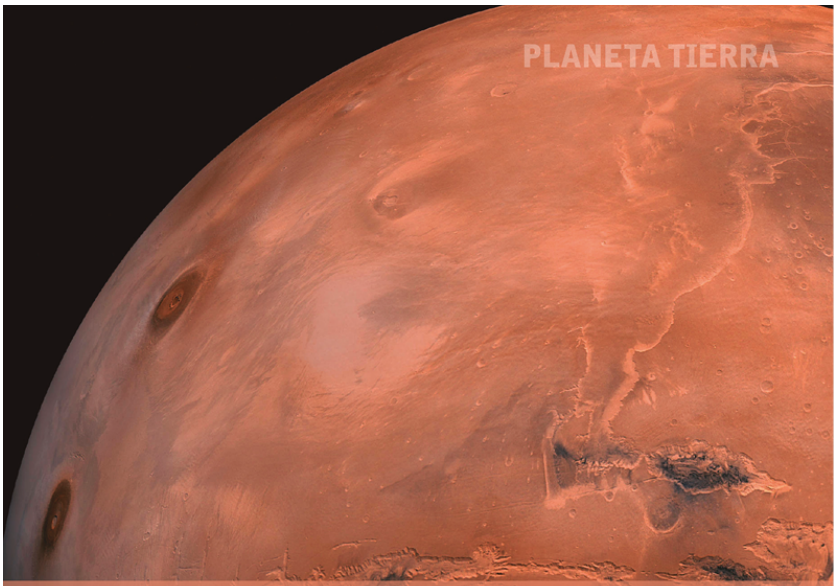
GEOLOGÍA DE MARTE

Eulogio Pardo Igúzquiza
y Juan José Durán Valsero

Un planeta fósil

Instituto Geológico y Minero de España

CATARATA



PLANETA TIERRA

GEOLOGÍA DE MARTE

Eulogio Pardo Igúzquiza
y Juan José Durán Valsero

Un planeta fósil

Instituto Geológico y Minero de España

CATARATA

Índice

INTRODUCCIÓN

1. LA "CIUDAD INCA": UNA ENIGMÁTICA ESTRUCTURA GEOLÓGICA

2. LA "CARA DE MARTE": UN MISTERIO RESUELTO

3. KASEI VALLES: UN CANAL GIGANTE...¿DE AGUA O DE LAVA?

4. UNA GEOLOGÍA FÓSIL

5. ¿HUBO UN OCÉANO EN MARTE?

6. LA DICOTOMÍA HEMISFÉRICA DE MARTE

7. ARAÑAS (SPIDERS): UNA CURIOSA GEOMORFOGOLOGÍA SIN ANÁLOGO TERRESTRE

8. MARTEMOTOS: TERREMOTOS EN MARTE

9. MEGAINUNDACIONES: LOS GRANDES CANALES DE DESCARGA (OUTFLOW CHANNELS) DE MARTE

10. DEPÓSITOS DELTAICOS EN EL PLANETA ROJO

11. VALLES MARINERIS: EL GRAN CAÑÓN DE MARTE

12. SUPERVOLCANES: LOS GIGANTES DE LAVA

13. CRÁTERES DE IMPACTO DE METEORITOS

14. EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN GEOLOGÍA: APLICACIÓN A LA SUPERFICIE DE MARTE

15. DATACIÓN DE SUPERFICIES MEDIANTE LA DENSIDAD DE LOS CRÁTERES DE IMPACTO

16. CASQUETES GLACIARES EN LOS POLOS DEL PLANETA

17. CUENCAS DE IMPACTO

18. ALH84001: UN METEORITO POLÉMICO

19. DEPRESIONES DE COLAPSO EN EMBUDO (COLLAPSE PITS)

20. LA CUENCA BOREALIS: LAS ENIGMÁTICAS LLANURAS DEL NORTE DE MARTE

21. HIDROGEOLOGÍA DE MARTE

22. THARSIS THOLUS: UN ESPECTACULAR VOLCÁN EXTENDIDO (SPREAD VOLCANO)

23. AGUA Y VIDA EN MARTE

24. CICLOS DE MILANKOVITCH EN ARABIA TERRA

25. LAHARES EN MARTE

26. EL DOMO VOLCÁNICO DE THARSIS: UNA SUPERESTRUCTURA VOLCÁNICA

27. ¿PLACAS TECTÓNICAS EN MARTE O UN PLANETA DE PLACA ÚNICA?

28. GEOMORFOLOGÍA MARCIANA: MISMAS FORMAS, DISTINTOS LUGARES

29. CUEVAS EN MARTE: UNA VENTANA AL FUTURO

30. LA MISIÓN INSIGHT: ESTUDIO DEL INTERIOR DEL PLANETA

31. LAS MISIONES MARINER: LOS PIONEROS

32. HELLAS PLANITIA: LA GRAN CUENCA DE IMPACTO DEL HEMISFERIO SUR

33. MARS GLOBAL SURVEYOR (MGS): LA SONDA CARTÓGRAFA DE MARTE

34. CURIOSITY: UN LABORATORIO DE GEOLOGÍA

35. EL REGOLITO DE MARTE: EL SUELO DEL PLANETA

36. RÍOS EN MARTE: LA UNIVERSALIDAD DE LOS MEANDROS

37. ¿DÓNDE BUSCAR FÓSILES EN MARTE?

38. MARTE, EL PLANETA ROJO

39. ¿KARST EN MARTE?

40. MOLA: LA TOPOGRAFÍA DE MARTE A ESCALA GLOBAL

41. EL CAMPO MAGNÉTICO MARCIANO

42. PERIODOS GEOLÓGICOS

43. ESTRUCTURA INTERNA DEL PLANETA

44. HiRISE: IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE DE MARTE

45. OLYMPUS MONS: EL MAYOR VOLCÁN DEL SISTEMA SOLAR

46. LA ATMÓSFERA DE MARTE

47. LAS SONDAS ESPACIALES VIKING: PRIMERAS IMÁGENES DESDE LA SUPERFICIE DEL PLANETA

48. ARGYRE PLANITIA: LA SEGUNDA CUENCA DE IMPACTO MÁS GRANDE DE MARTE

49. LOS RÓVERES SPIRIT Y OPPORTUNITY

50 . DDS-SEEPAGES: REZUMES DESDE PUNTOS OSCUROS EN DUNAS

51. ANÁLOGOS TERRESTRES DE LA GEOLOGÍA DE MARTE

52. ALBA PATERA:EL GIGANTE VOLCÁNICO

53. LA REGIÓN VOLCÁNICA DE ELYSIUM

54. ROCAS CON ESTRATIFICACIÓN CRUZADA: ¿PRUEBA DE UN FLUJO DE AGUA?

55. LÍNEAS RECURRENTES EN LADERAS (RSL): ¿FLUJOS ESTACIONALES DE AGUA LÍQUIDA?

56. LA SONDA MARS PATHFINDER Y EL PRIMER RÓVER SOBRE MARTE: EL SOJOURNER

57. EL "EFECTO ANTÍPODAS" DE LOS GRANDES CRÁTERES DE IMPACTO

58. DEPÓSITOS LACUSTRES EN MARTE: REMINISCENCIAS DE PALEOLAGOS

59. CONOS DE TAMAÑO KILOMÉTRICO: ¿VOLCANES DE LODO EN MARTE?

60. ¿EXISTEN SISTEMAS DE CAVERNAS EN LAS LLANURAS DEL NORTE DE MARTE?

61. EL FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA EN MARTE, OBJETIVO: COLONIZAR EL PLANETA

BIBLIOGRAFÍA

Eulogio Pardo Igúzquiza

Tras doctorarse en Ciencias Geológicas en la Universidad de Granada, donde fue profesor titular, ha sido investigador posdoctoral en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (EE UU), en el Department of Mining and Mineral Engineering de la Universidad de Leeds (Reino Unido), en el Department of Meteorology de la Universidad de Reading (Marie Curie Fellowship) y en la Universidad de Granada (Ramón y Cajal Fellowship). En la actualidad realiza su labor investigadora en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en Madrid.

Juan José Durán Valsero

Científico titular del IGME y director del Departamento de Investigación en Recursos Geológicos. Doctor en Ciencias Geológicas y licenciado en Geografía e Historia, ha sido profesor asociado en la Universidad Autónoma de Madrid. Es codirector de la Unidad Asociada entre el IGME y la Universidad de Málaga sobre Estudios Hidrogeológicos Avanzados y académico correspondiente de la Academia Malagueña de Ciencias.

Eulogio Pardo Igúzquiza

Juan José Durán Valsero

Geología de Marte

Un planeta fósil

Colección Planeta Tierra

comité editorial

Isabel Rábano Gutiérrez del Arroyo

Juan José Durán Valsero

Luis Roberto Rodríguez Fernández

Alejandro Robador Moreno

Eulogio Pardo Igúzquiza

Benigno Asensio Nistal

Javier Sénen García

Arantza Chivite Vázquez

Catálogo general de publicaciones oficiales

www.060.es

DISEÑO DE CUBIERTA: MARTA RODRÍGUEZ PANIZO

© Eulogio Pardo Igúzquiza y Juan José Durán Valsero, 2020

© instituto geológico y minero de españa, 2020

© Los libros de la Catarata, 2020

Fuencarral, 70

28004 Madrid

Tel. 91 532 20 77

www.catarata.org

Geología de Marte.

Un planeta fósil

isbne: 978-84-1352-968-4

ISBN (Catarata): 978-84-9097-898-6

ISBN (IGME): 978-84-9138-096-2

NIPO: 836-20-012-X

DEPÓSITO LEGAL: M-7049-2020

THEMA: RBG/1ZMCF

este libro ha sido editado para ser distribuido. La intención de los editores es que sea utilizado lo más ampliamente posible, que sean adquiridos originales para permitir la edición de

otros nuevos y que, de reproducir partes, se haga constar el título y la autoría.

INTRODUCCIÓN

En Marte, un planeta sin océanos ni vegetación, la “geología” se muestra en todo su esplendor, si por “geología” podemos entender aquí la expresión litológica y estructural de la configuración de un planeta que no es la Tierra. Sin embargo, a diferencia de la Tierra, que es un planeta geológicamente muy activo, la geología de Marte parece haberse detenido en el tiempo y observamos en la actualidad un planeta sin cambios significativos frente a cómo estaba hace unos 3.000 millones de años. Se trata, por tanto, de una geología que podemos calificar de “fósil”, con unas estructuras geológicas principales ya formadas miles de millones de años atrás. No obstante, esto no significa en modo alguno que la geología de Marte sea aburrida y simple, sino que es compleja y resulta fascinante tanto la global, de grandes estructuras y escala planetaria, como a escala regional y local. Hasta el geólogo más experimentado en la Tierra puede llevarse sorpresas al acercarse a ella. Marte está lleno de enigmas geológicos, de misterios científicos, muchos de ellos todavía no resueltos. Entre las grandes preguntas están: ¿es Marte un planeta de una única placa tectónica? ¿Por qué son tan gigantescos sus volcanes? ¿Hubo alguna vez un océano? ¿Tiene actividad sísmica? Y, por supuesto, la pregunta fundamental: ¿hubo vida en Marte?, que podría incluso extenderse a otra aún más excitante, ¿hay vida en la actualidad? Además, existen otras muchas preguntas no tan sentenciosas y que pueden ser de gran interés, no solo para un lector especializado, sino para cualquier lector curioso que guste del misterio científico, la aventura espacial y el avance de la ciencia.

Ningún ser humano ha caminado sobre la superficie de Marte, por lo que ningún geólogo ha podido hacer observaciones directas en los afloramientos sobre el terreno. Sin embargo, la ingente cantidad de información que la agencia espacial norteamericana (la NASA) ha recolectado en forma de imágenes y datos geofísicos y geoquímicos, a partir de los diferentes orbitadores, aterrizadores, róveres y laboratorios geológicos que han circulado, y están

circulando, sobre la superficie del planeta, ha hecho que en las últimas décadas se incremente de modo exponencial el conocimiento geológico disponible. Si observásemos de cerca el planeta rojo, nos llamarían la atención los gigantescos cráteres de impacto (de meteoritos) de forma circular y de todos los tamaños, similares a los que podemos observar en la Luna o en otros planetas como Mercurio. En la Tierra solo se han preservado unos pocos cráteres de impacto de cierto tamaño, pues la inmensa mayoría han sido destruidos por la tectónica de placas y la erosión. Sin embargo, curiosamente, no toda la superficie de Marte está cubierta de estos cráteres, hasta el punto de que se puede hablar de una "dicotomía hemisférica" en el planeta, donde el hemisferio sur, más antiguo, está saturado de cráteres, mientras que el hemisferio norte, más moderno, contiene muy pocas de estas estructuras de impacto. Se trata de las tierras altas del sur frente a las tierras bajas del norte. En ocasiones, los cráteres de impacto son de dimensiones colosales (los 1.700 km de diámetro de Argyre, por ejemplo) y se denominan "cuencas de impacto". Estas cuencas constituyen zonas endorreicas que en algún momento debieron formar un gran lago o mar interior, como parecen indicar las rocas sedimentarias de depósitos deltaicos y otras evidencias encontradas en su interior. Las tierras bajas del norte forman la zona de llanuras más plana del sistema solar y se cree que en el pasado geológico de Marte pudieron albergar un gigantesco océano. Así lo indican, por lo menos, las supuestas paleolíneas de costa y la línea equipotencial, que marcan más de 50 depósitos deltaicos estudiados hasta la fecha.

Otra morfología que impresiona de la geología de este planeta es la gran provincia volcánica formada por el domo volcánico de Tharsis, que cubre casi una quinta parte de la superficie del planeta. Sobre dicho domo se desarrollan la gran mayoría de sus gigantescos volcanes, como los megavolcanes Olympus Mons y Alba Patera. Por otra parte está la provincia volcánica de Elysium, la segunda más grande del planeta, con el volcán gigante Elysium Mons. En relación al domo volcánico de Tharsis, se encuentra también el Gran Cañón de Marte, Valles Marineris, que deja pequeño al gigantesco Gran Cañón del Colorado terrestre, aparte de tener orígenes muy diferentes. De los bordes del domo de Tharsis surgen gigantescos canales que indican que en el pasado se produjeron megainundaciones sobre la superficie de Marte. El planeta tiene

probablemente una “hidrosfera” subterránea (que posiblemente no esté formada solo de agua, sino también de otros compuestos como CO2 y metano, por ejemplo) confinada por una criosfera de permafrost o suelo helado. Esta es la hidrogeología básica de Marte, que genera estructuras curiosas cuando se rompe el confinamiento. También destacaríamos, a gran escala, los casquetes polares y toda la geomorfología relacionada con los mismos.

A partir de aquí hay que pasar a considerar cuestiones a menor escala. De este modo, veríamos toda la geomorfología producida por el viento, con grandes campos de dunas y la dinámica del CO2, que se sublima en verano para incrementar la presión atmosférica, mientras que precipita en invierno para incrementar los casquetes glaciares y cubrir la zona periglaciar, y contribuir al permafrost del suelo. Los róveres de la NASA han mostrado rocas estratificadas, con laminaciones cruzadas, contactos de diferentes formaciones geológicas, grietas de retracción por secado, fracturación y diaclasado, mineralización de fracturas, fallado y plegamiento de las rocas; en definitiva, los mismos rasgos geológicos que observamos en la Tierra.

Toda esta geología se describe en este libro. Sin embargo, no hemos pretendido escribir un libro árido y aburrido, por lo que presentamos la geología de Marte en pequeñas dosis, como una selección de perlas. Esto es, detalles de gran interés que el lector puede leer en cualquier orden. En efecto, se propone al lector un paseo aleatorio por el paisaje de Marte. Para ello, el libro está dividido en 61 apartados, que tratan otros tantos aspectos geológicos del planeta Marte, así como las sondas e instrumentos científicos, fundamentalmente de la NASA, que hicieron posible obtener dicha información geológica.

Aproximadamente la mitad de este libro es material gráfico. El lector debe observar y disfrutar de unas imágenes que permiten viajar con la imaginación al planeta rojo. Son un privilegio que podemos disfrutar gracias al espíritu de ciencia abierta de la NASA que los mejores científicos de un pasado muy cercano no pudieron ni imaginar.

Aunque el conjunto de minicapítulos podría haberse clasificado en grandes bloques geológicos y técnicos (volcanismo, tectónica,

geomorfología, geodinámica, geofísica, sondas espaciales, etc.), hemos considerado que la lectura perdería agilidad; precisamente uno de los atractivos del libro es poder leer a conveniencia estas perlas de la geología de Marte.

La bibliografía científica sobre la investigación geológica de este planeta es ingente. Sin embargo, suele aparecer en libros y revistas especializados que, con frecuencia, no son fácilmente accesibles para el gran público. Con este libro proponemos una primera introducción a la geología de Marte que, esperamos, fascine y sorprenda al lector y le anime a profundizar más en los aspectos geológicos de otros planetas del sistema solar y, por supuesto, también de la Tierra.

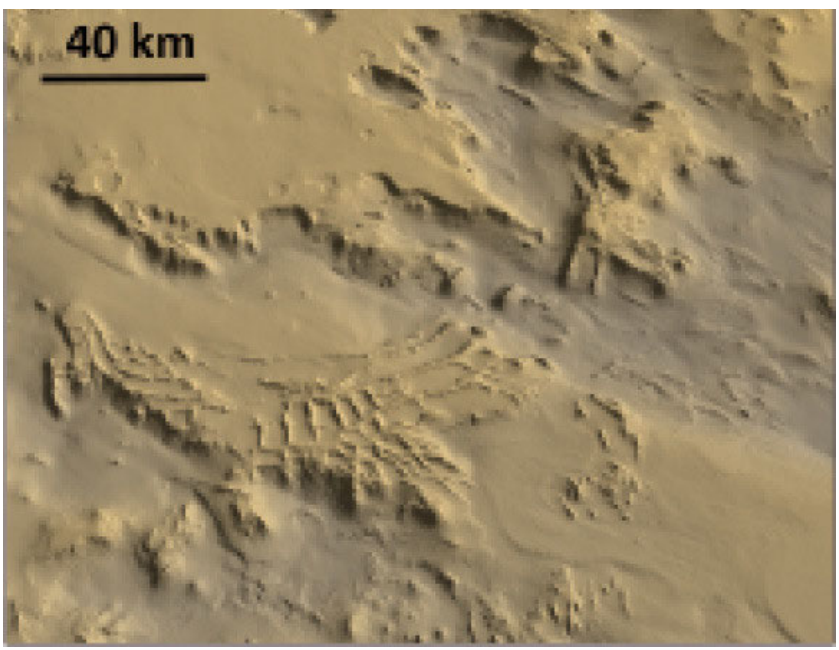
¿Cómo usar este libro? Las siguientes páginas permit
-
guida del número del apartado correspondiente para

1. La ‘ciudad inca’: una enigmática

estructura geológica

La “ciudad inca” (figura 1) es el nombre informal que los científicos de la misión Mariner 9 (→31) dieron a una estructura geológica formada por un entramado de promontorios rectilíneos entrelazados que se localizan en el polo sur marciano. Este nombre se debe al parecido que dicha estructura tiene con una ciudad prehispánica en ruinas, como podría ser Machu Picchu, vista desde un avión. El nombre oficial de esta región de Marte es Angustus Labyrinthus.

Figura 1



La “ciudad inca” en el polo sur de Marte. Se puede observar el entramado

de promontorios rectilíneos que recuerdan una ciudad en ruinas.

Imagen: Eulogio Pardo, a partir de MOLA y 3DEM.

Lo más enigmático de esta estructura es el desconocimiento que se tiene sobre su origen. La interpretación más extendida sobre su formación es que se trata de dunas antiguas (paleodunas) que fueron cubiertas por los depósitos bandeados (→16) que forman el casquete polar en el polo sur marciano. Posteriormente, se endurecieron (o litificaron) y más tarde quedaron expuestos los trenes de dunas por la erosión de los depósitos que los cubrían. Otras teorías consideran que se trata de diques que se formaron por las inyecciones de roca fundida (magma) o de sedimentos que rellenaron grietas del subsuelo y que posteriormente se litificaron, antes de ser expuestas por la erosión eólica. La figura 1 muestra la “ciudad inca” a partir de los datos del modelo digital de elevaciones MOLA. En el año 2002, la Mars Orbiter Camera (MOC), a bordo de la Mars Global Surveyor (MGS) (→33), proporcionó imágenes con nueva información sobre la “ciudad inca”. En particular, las nuevas imágenes muestran cómo forma parte de una estructura circular de gran tamaño que podría ser un antiguo cráter meteorítico, con fracturas radiales y concéntricas que se rellenaron de material que se litificó y que posteriormente quedaron al descubierto por la erosión.

2. La ‘cara de Marte’: un misterio resuelto

La topografía del terreno puede jugar, a veces, malas pasadas, haciéndonos ver formas y patrones que en realidad no son lo que parecen. Este fenómeno psicológico, que consiste en percibir formas reconocibles a partir de información o estímulos aleatorios, se conoce como pareidolia. Un ejemplo es el famoso caso de la “cara de Marte”, un montículo en la región de Cydonia (CY en la figura 6, pág. 27) que se asemeja a una cara humana, como puede verse en la figura 2, tomada por la sonda espacial (orbitador) Viking 1 (→47). Este rasgo geomorfológico se hizo muy popular en libros, prensa, radio, televisión e incluso en el cine, donde se trataban temas ufológicos y donde la “cara de Marte” se tomaba como “prueba” de un hipotético artefacto extraterrestre construido por seres alienígenas con un propósito desconocido.

La región donde está ubicada la cara, la ya mencionada Cydonia, es una zona de transición entre las tierras altas, más antiguas y llenas de cráteres, y las llanuras más modernas del norte de Marte. Esta zona tiene cientos de mesas, montículos, mogotes y crestas (figura 2). Uno de estos montículos es la cara de Marte. El misterio fue resuelto por la tecnología, cuando se obtuvieron imágenes de alta resolución (figura 3) y se pudo constatar, para desilusión de muchos, que la famosa cara no era sino un juego de sombras de la luz solar con la topografía.

Figura 2

La “cara de Marte”, en la región de Cydonia. La imagen muestra montículos erosionados

de tipo mesa. Uno de ellos, en la parte superior, parece una cara humana. Esto es debido

al juego de sombras con la topografía, que producen la ilusión óptica de estar viendo los ojos, la nariz y la boca de una persona. Este montículo tiene un tamaño de unos 1.500 metros.

Los puntos negros de la imagen son errores (píxeles sin información) en la transmisión

de datos. Esta imagen fue tomada por el orbitador Viking 1 el 25 de julio de 1976.

Imagen: NASA/JPL.

Figura 3

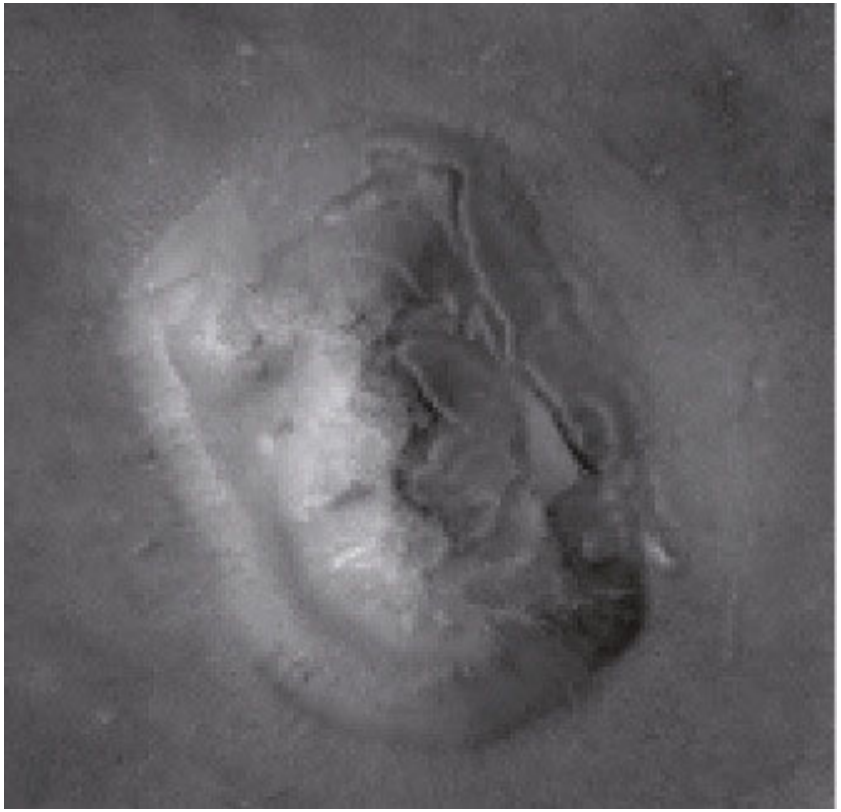


Imagen de alta resolución de la “cara de Marte” tomada en abril de 2001 por la Mars Orbiter Camera (MOC) a bordo de la sonda Mars Global Surveyor de la NASA. Se observa

cómo la famosa “cara de Marte” no es sino un montículo erosionado (figura 2).

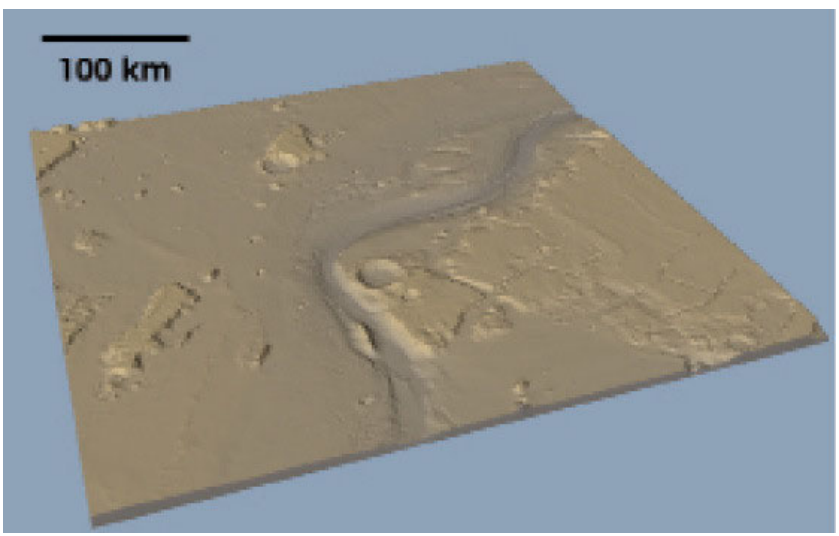
Imagen: NASA/JPL/Malin Space Science Systems.

3. Kasei Valles: un canal gigante...

¿de agua o de lava?

Kasei Valles representa el mayor sistema geomorfológico de descarga de un fluido (drenaje) que se ha observado en Marte, con una longitud de 2.000 km y varios centenares de km de anchura. Su apariencia en superficie (figura 4) evoca los paisajes formados por avenidas catastróficas de agua en la Tierra. Pero, por otra parte, tiene características que lo hacen similar a antiguos canales volcánicos. Por lo tanto, surge la pregunta: ¿es un canal de agua o de lava? Por sus gigantescas dimensiones, Kasei Valles es un megacanal y, si se confirmase que fue erosionado por lava, pasaría a ser el mayor canal volcánico conocido hasta la fecha en el sistema solar.

Figura 4



El canal gigante de Kasei Valles muestra una trayectoria meandriforme y forma

el thalweg, o vaguada, de un canal de inundación de 300 km de ancho. La dirección

del flujo va de la esquina inferior izquierda hacia la esquina superior derecha.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

No obstante, la interpretación más extendida sobre el origen de estos canales es que son el resultado de gigantescas avenidas de agua, que se han interpretado como salidas catastróficas de ingentes cantidades de fluido que se encontraba en acuíferos confinados por un subsuelo helado en su parte superior. Pero, por otro lado, también se han encontrado evidencias de voluminosas emisiones de un magma de baja viscosidad en la cabecera de Kasei Valles. De hecho, el levantamiento y la formación de la provincia volcánica de Tharsis (→26), con la consiguiente emisión de lava que forma dicha superestructura volcánica, parecen ser el origen de la súbita salida de agua de los acuíferos, al haberse fundido el sello congelado que confinaba el agua en los mismos. Por consiguiente, podría darse el caso de que la formación de la llanura de inundación de la figura 4 tuviera su origen en un flujo de agua, mientras que el canal meandriforme fuese producto de la incisión de un flujo de lava. Todavía hay muchas incógnitas y los investigadores parecen inclinarse por una de las dos teorías, un origen acuoso o un origen volcánico, ya que encuentran argumentos válidos para defender ambas.

4. Una geología fósil

La geología de Marte, a escala global, parece haberse detenido en el tiempo hace unos 3.000 millones de años. Como ya hemos mencionado, la superficie de Marte presenta dicotomía hemisférica, con una superficie saturada de cráteres de impacto en el hemisferio sur y grandes llanuras en las tierras bajas del hemisferio norte. Asimismo, la gran cicatriz geológica del Gran Cañón Valles Marineris (→11), el gran domo volcánico de Tharsis (→26), los grandes sistemas de descarga y drenaje (→9) parecen no haber cambiado en los últimos millones de años. Nos encontramos, por consiguiente, con una geología que podría denominarse "fósil". Bien es cierto que, a escala local, se han producido eventuales impactos de meteoritos, flujos de lava, erosión eólica, pequeñas descargas de agua líquida y avances y retrocesos de los casquetes glaciares, así como la formación de depósitos bandeados (→16) en los polos que apenas han modificado el paisaje marciano y que pueden ser considerados como suaves arañazos "recientes" en la superficie del planeta rojo.

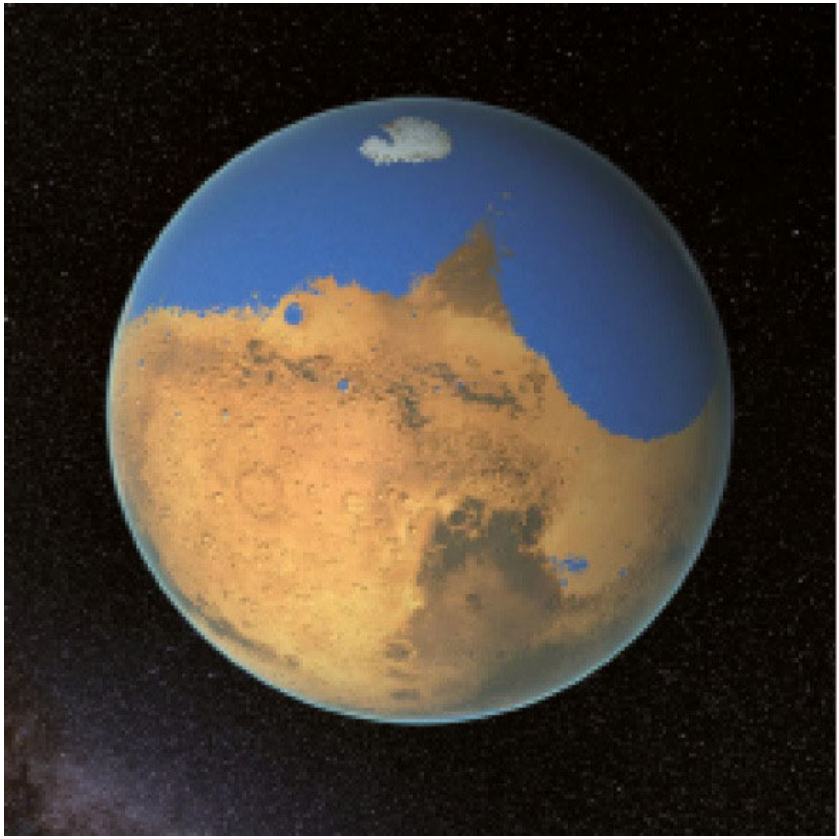
5. ¿Hubo un océano en Marte?

Hay una serie de evidencias que sugieren que en las tierras bajas (→20), en las llanuras del norte de Marte (zonas planas, suaves y sin rasgos topográficos acusados), hubo una vez un gran océano que podría haber ocupado un tercio de la superficie del planeta. Utilizando imágenes de alta resolución, se ha estudiado la distribución de más de 50 paleodeltas y se ha comprobado cómo su distribución delimita una superficie equipotencial (esto es, de elevación constante o a nivel del mar) que cae dentro de las tierras bajas del norte del planeta.

Otra evidencia a favor del presunto antiguo océano son las supuestas paleolíneas de costa en las llanuras del norte. Estas paleolíneas se detectan como contactos geológicos distintivos que se extienden a lo largo de miles de kilómetros. Sin embargo, como no siguen una superficie equipotencial, la hipótesis de que fuesen formadas por un paleocéano se debilita. No obstante, una posible explicación de esta desviación de una equipotencial es la deformación que sufrió el terreno por el emplazamiento del gigantesco domo volcánico de Tharsis (→26), ya que se cree que este paleocéano debió de formarse antes o de modo coetáneo al emplazamiento de Tharsis. Asimismo, se han encontrado bloques de rocas y estructuras de tamaño métrico con forma de cráter que son consistentes con el transporte por icebergs y el varamiento de los mismos en el fondo del océano.

El antiguo océano, si existió, debió de formarse hace unos 3.500 millones de años. También se ajusta a este modelo la disposición de las antiguas redes de drenaje. Por consiguiente, parece que pudo existir una hidrosfera global y activa, lo que implicaría unas condiciones ambientales húmedas y cálidas, muy diferentes a las que prevalecen hoy día en Marte, y que pudieron propiciar el origen de algún modo de vida.

Figura 5



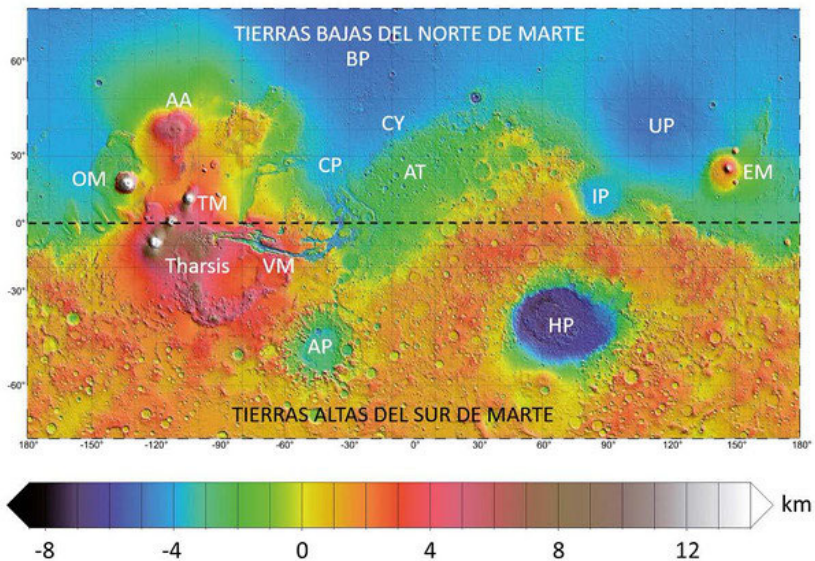
Los científicos de la NASA han determinado que, en un pasado remoto,

Marte tuvo un océano, como se puede visualizar en la recreación artística de esta imagen. Imagen: NASA/GSFC.

6. La dicotomía hemisférica de Marte

Si se observa la superficie de Marte a escala global, el rasgo más prominente es la dicotomía, aproximadamente hemisférica, entre las tierras altas del hemisferio sur, más antiguas, y las tierras bajas del hemisferio norte. La diferencia de alturas medias entre ambos hemisferios es de unos 4 km. El hemisferio sur está saturado de cráteres de impacto, mientras que el norte tiene muchos menos, y más recientes, como corresponde a una superficie más moderna; en términos relativos, ya que la dicotomía hemisférica de Marte es uno de los rasgos más antiguos del planeta, con más de 4.000 millones de años de antigüedad. En parte, el límite de la dicotomía está oculto por el domo volcánico de Tharsis (→26), que se encuentra bajo más de 30 km de basalto. El límite tampoco está muy claro en la región de Arabia Terra (→24), donde la topografía y el espesor de la corteza presentan valores intermedios entre los de las tierras altas y las bajas. Los científicos han mostrado, mediante métodos de inversión gravimétrica y topográfica, cómo el límite entre ambas tierras, aunque complejo, se ajusta muy bien a una elipse que cubre las tierras bajas del norte (la cuenca Borealis →20), con unas dimensiones aproximadas de 11.000 km por 9.000 km. También han sugerido que la formación de esta dicotomía se debe a un impacto gigante evidenciado por la mayor cuenca de impacto (→17) conocida hasta la fecha en el sistema solar. La raíz geológica de la dicotomía es un cambio en el espesor de la corteza, con una media de 60 km de espesor en las tierras altas del sur y de 40 km de espesor en las tierras bajas del norte.

FIGURA 6



Mapa de la topografía de Marte con escala de colores para representar la altitud. La línea discontinua negra marca el ecuador del planeta y la delimitación aproximada de la dicotomía hemisférica. Este mapa utiliza la proyección de Mercator y representa el planeta entre las latitudes 70º norte y 70º sur. Se han señalado los principales nombres geográficos de Marte: TM: Tharsis Mons; OM: Olympus Mons; AA: Alba Patera; CP: Chryse Planitia; BP: Borealis Planitia; VM: Valles Marineris; AP: Argyre Planitia; AT: Arabia Terra; CY: Cydonia; HP: Hellas Planitia; IP: Isidis Planitia; UP: Utopia Planitia; y EM: Elysium Mons.
Imagen: NASA. Obtenida a partir del altímetro MOLA a bordo de la sonda Mars Global Surveyor.

7. Arañas (spiders): una curiosa geomorfología sin análogo terrestre

Aunque la gran mayoría de las estructuras geológicas de Marte tienen un análogo terrestre, hay otras que son exclusivas del planeta rojo. Este es el caso de las arañas (spiders) que pueden verse en la figura 7. Se trata de canales excavados por un gas (CO_2), que presentan una organización radial y se hacen más anchos y profundos conforme convergen hacia el centro de emanación del gas. Este es un proceso que no encontramos en la Tierra, pero que es común en los terrenos bandeados del polo sur de Marte. Existe una gran diversidad de estas formologías topográficas aracniformes; la figura 7 presenta el tipo correspondiente a las “arañas aisladas”.

Figura 7

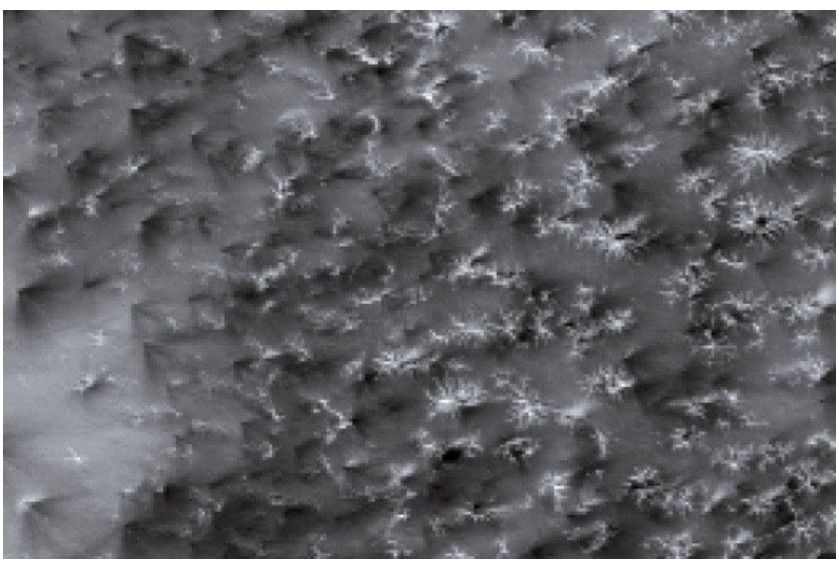


Imagen de alta resolución tomada por la cámara HiRISE que

muestra las “arañas aisladas”.

Su tamaño medio es de 500 m.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

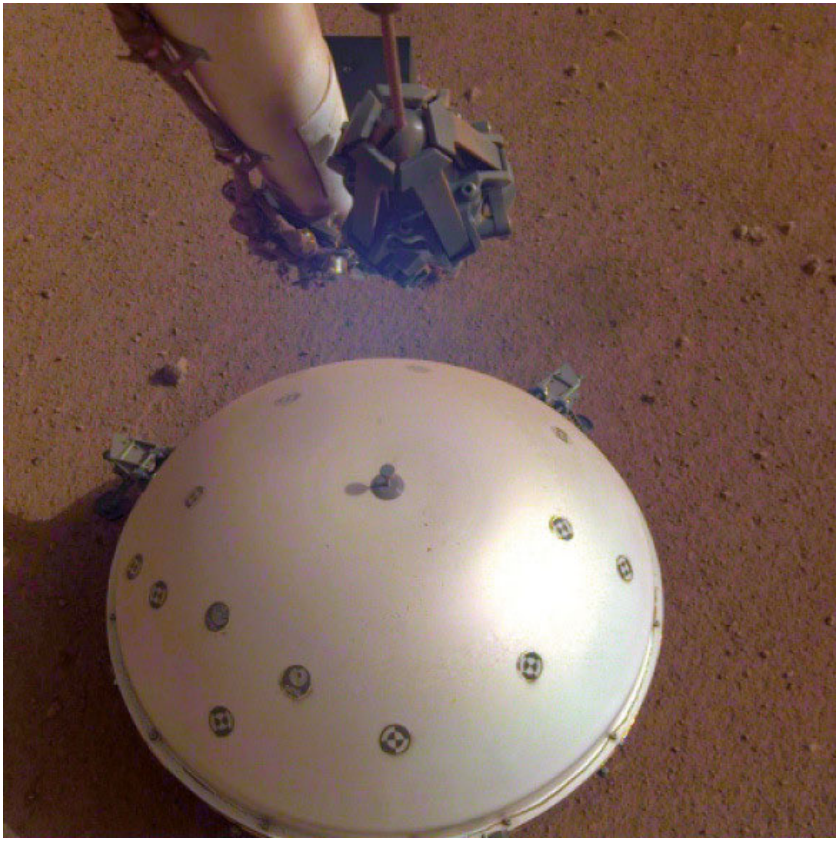
8. Martemotos: terremotos en Marte

Al igual que un terremoto en la Tierra, un martemoto es un movimiento sísmico del terreno. La mayor parte de los terremotos de la Tierra están originados por la dinámica cortical asociada a la tectónica de placas. Sin embargo, no parece que haya tectónica de placas en Marte (→27). Entonces, ¿cuál es su origen?

Además de los causados por el impacto de meteoritos, investigadores de la Universidad de California han propuesto que pueden estar causados por acuíferos confinados con sobrepresión. El confinamiento lo provocarían las bajas temperaturas del planeta que congelan las capas superiores del acuífero. El aterrizador InSight (→30) de la NASA ha detectado recientemente un martemoto producido a poca profundidad, cuyo origen se cree que está en la descompresión del agua subterránea u otro fluido del subsuelo presente en un acuífero confinado. De este modo, los martemotos podrían proporcionar una evidencia indirecta de la existencia de agua subterránea y sería un procedimiento para localizar dicho recurso en futuras misiones tripuladas a Marte. Además, las simulaciones por ordenador han revelado dos posibles orígenes de los martemotos someros. Por una parte, los “tirones gravitatorios” de Fobos, el satélite más grande de Marte (el otro es Deimos) y, por otra, los cambios súbitos de presión atmosférica causados por el calentamiento y enfriamiento de su delgada atmósfera.

Previamente al aterrizador InSight solo se tenían evidencias de posibles movimientos a partir de observaciones secundarías de fotografías, como grupos de bloques de rocas situados al final de las laderas de fosas relacionadas con fallas. Se piensa que estos bloques cayeron ladera abajo por el efecto de sacudida de antiguos martemotos asociados a dichas fallas geológicas. Esta prueba indirecta indicaría la existencia de martemotos “tectónicos”.

Figura 8



La imagen muestra, sobre la superficie de Marte, el domo que protege

el sismómetro del aterrizador InSight. El sismómetro se conoce

como SEIS: Seismic Experiment for Interior Structure.

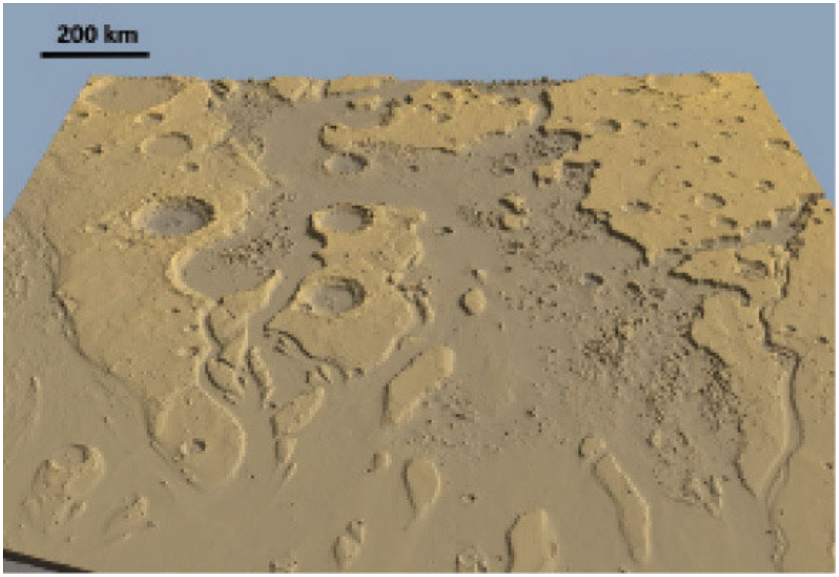
Imagen: NASA/JPL-Caltech.

9. Megainundaciones: los grandes canales de descarga (outflow channels) de Marte

En varias zonas de Marte encontramos un paisaje con una geomorfología que preserva la acción de las mayores inundaciones conocidas en el sistema solar. Estas grandes descargas de agua se produjeron en varias regiones de la intersección entre el gran domo volcánico de Tharsis y las tierras bajas del norte, de tal modo que el agua viajó desde dichas regiones hacia la zona deprimida del norte. La mayoría de estas descargas se produjeron hace más de 1.000 millones de años. Los indicios parecen mostrar que el agua estaba en el subsuelo, en una hidrosfera subterránea confinada por una criosfera helada en las capas más superficiales (permafrost). El ascenso de lava en relación al levantamiento y formación del domo volcánico de Tharsis hizo que una gran parte de dicha criosfera desapareciera súbitamente, liberando volúmenes ingentes de agua, debido a que la hidrosfera estaba a sobrepresión.

Las megaavenidas que formaron los canales que se muestran en la figura 9 son solo comparables, en magnitud, a las corrientes oceánicas en la Tierra. Los investigadores piensan que este episodio de megaavenidas condujo a la formación de un océano en las tierras bajas del norte de Marte, lo que, unido al volcanismo coetáneo en el domo de Tharsis, implicaría unas temperaturas más altas que las actuales y una atmósfera más densa. Todo ello indujo un ciclo hidrológico completo sobre la superficie del planeta, conocido como la hipótesis MEGAOUTFLO (Mars Episodic Glacial Atmospheric Oceanic Upwelling by Thermotectonic Flood Outburst) en la literatura científica, que involucra episodios de corta duración a escala geológica (unas cuantas decenas de millones de años) en los que el clima cambia de modo drástico, llegándose a establecer, como se ha dicho, un ciclo hidrológico, lo que podría implicar condiciones favorables para la vida.

Figura 9



Paisaje de la región de Margaritifer Terra. Muestra los indicios del paso de una inundación gigantesca que se expandió desde la parte superior de la imagen hacia la inferior.

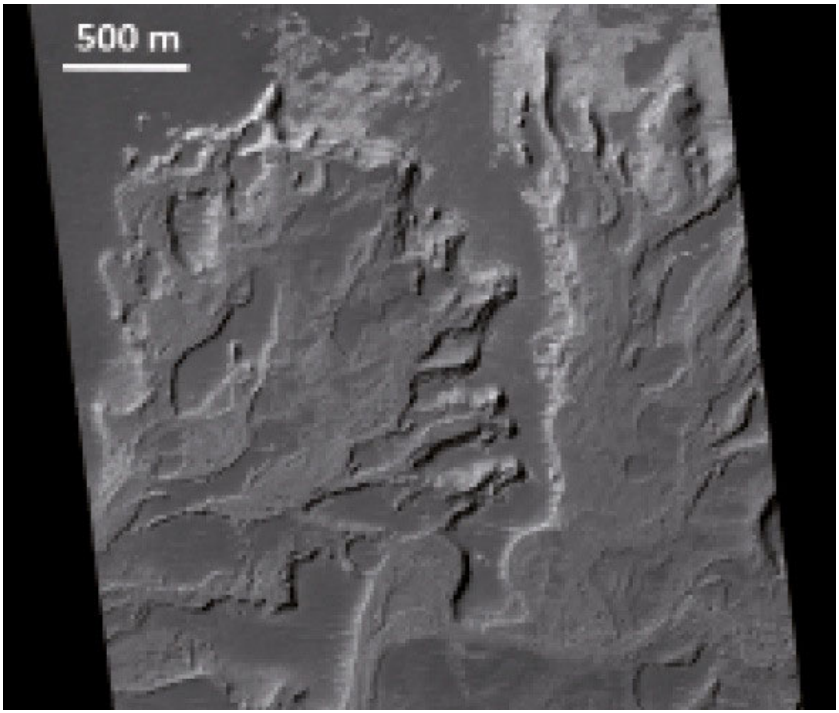
Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

10. Depósitos deltaicos en el planeta rojo

La existencia de depósitos deltaicos en Marte es de gran relevancia, pues implica que en el planeta se dieron las condiciones físicas para la existencia de dicho ambiente sedimentario. Ello implica el transporte de los sedimentos detríticos típicos de los deltas por un flujo de agua que, al llegar a un gran cuerpo de agua (un mar o un gran lago) que marca el nivel de base, pierde su energía y se frena, depositando la carga de los sedimentos que transporta. Muchos deltas en Marte se pueden encontrar en cráteres como el mostrado en la figura 10. Sin embargo, otros deltas no se presentan en el interior de cráteres y se han asociado a un océano primigenio, de modo que su cartografía ha servido para delimitar la paleolínea de costa (→5). Los depósitos deltaicos no deben confundirse con los abanicos aluviales que también se encuentran en Marte (figura 11) y que presentan una morfología similar, con forma de abanico o deltaica (esto es, la de la letra grieta delta, Δ, de donde viene el nombre), aunque los tipos de depósitos sedimentarios son muy diferentes. Un abanico aluvial es el depósito resultante de una corriente efímera de agua en la ladera de una montaña (en la figura 11, en la ladera de un cráter), lo que implica un cambio brusco de pendiente y la pérdida de energía y capacidad de transporte de la corriente con el consiguiente depósito de los derrubios que arrastra. Por otra parte, a diferencia del abanico aluvial, los depósitos deltaicos implican una corriente regular en el tiempo que aporte agua a un gran cuerpo de agua estática. La distinción entre estos dos tipos de depósitos sobre el terreno es fácil para un geólogo, pero se complica cuando se hace exclusivamente a partir de imágenes de satélite de un planeta fósil como Marte. Por ello, los científicos están utilizando índices morfométricos que se pueden calcular de los modelos digitales de elevaciones de alta resolución de estos depósitos, construidos a partir de pares de imágenes estereoscópicas. De este modo, los perfiles topográficos de los depósitos verdaderamente deltaicos muestran un gran desarrollo longitudinal, con roturas de pendiente y un claro escalón terminal, mientras que los abanicos aluviales tienen un perfil longitudinal

constante o cóncavo y una pendiente mayor.

Figura 10



Esta fotografía de alta resolución muestra un depósito deltaico muy bien conservado dentro

del cráter Eberswalde. La imagen fue tomada por la cámara más avanzada enviada a otro planeta, HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), y en ella se observa claramente la morfología de canales distributarios y, en la parte central inferior, un meandro estrangulado. Se trata de un relieve invertido, en el sentido de que lo que en el pasado se depositó en áreas deprimidas como canales, en la actualidad resalta en el terreno.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

Figura 11

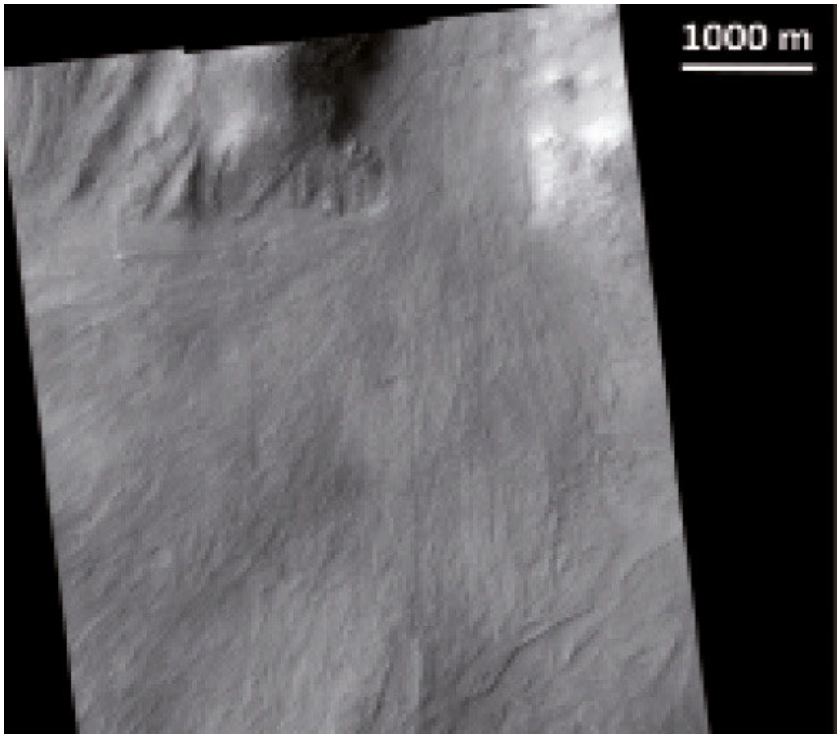
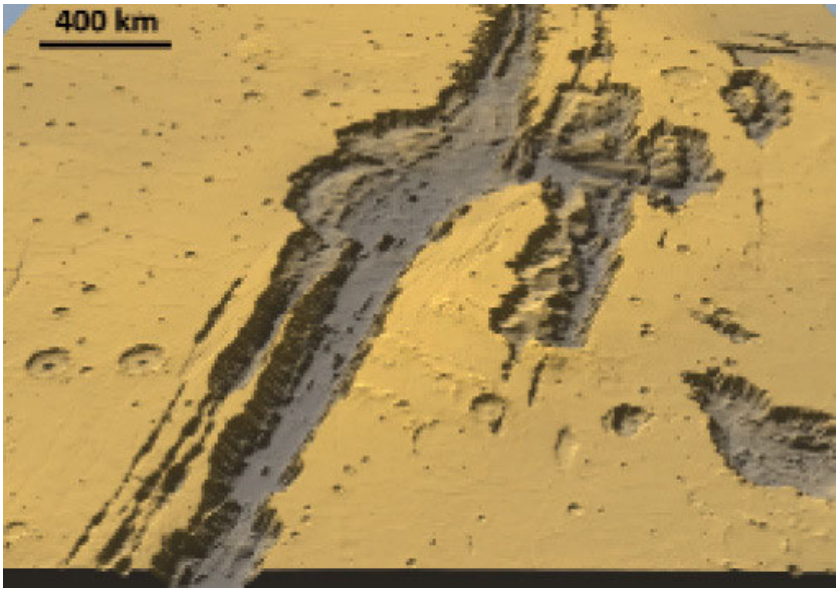


Imagen tomada por la HiRISE de un depósito de abanico aluvial en un cráter de impacto. Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

11. Valles Marineris: el Gran Cañón de Marte

Si en la Tierra nos asombramos con el Gran Cañón del Colorado, en Marte tenemos Valles Marineris, el Gran Cañón de Marte, que empequeñece al famoso cañón de Arizona. Si el del Colorado tiene 450 km de longitud y 2 km de profundidad, Valles Marineris (figuras 12 y 13) tiene una longitud de 4.500 km y 8 km de profundidad, lo que lo convierte en el mayor cañón conocido de todo el sistema solar. No obstante, no es el tamaño la principal diferencia entre ambos, sino su origen geológico. Mientras el terráqueo Gran Cañón del Colorado tiene su origen en la erosión fluvial por la incisión del río Colorado sobre las diferentes capas de estratos, Valles Marineris tiene un origen tectónico-volcánico. Es decir, se ha originado por fuerzas tectónicas de distensión en relación con la elevación y creación del domo volcánico de Tharsis. Nada que ver, pues, con la erosión fluvial de un río. Geológicamente, el cañón marciano es una fosa tectónica o, mejor dicho, un sistema de fosas tectónicas o grábenes, que, también a diferencia de la Tierra, no se han originado debido a una tectónica de placas, sino como la respuesta de desplazamiento tectónico por la apertura de una gran fractura en relación con el empuje de un gigantesco punto caliente (hot spot) de magma en el manto del planeta, muy cerca de la superficie. En conexión con ella, grandes volúmenes de lava formaron los supervolcanes y las placas volcánicas que dieron lugar al gran domo de Tharsis (→26).

Figura 12



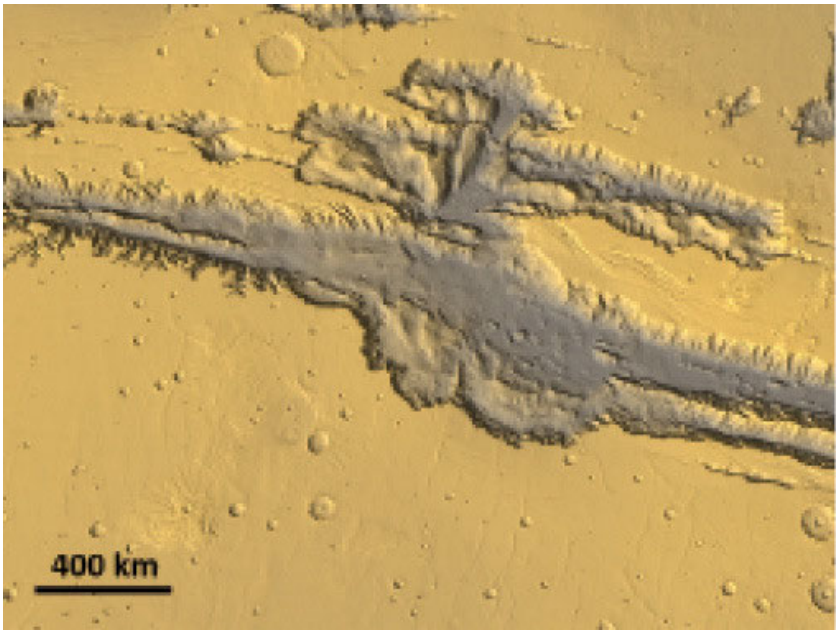
Impresionante vista oblicua de Valles Marineris. Conviene observar la escala gráfica,

que indica la anchura del valle (que en algún lugar supera los 400 km) y su longitud,

que alcanza 4.500 km.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

Figura 13



Vista cenital del Gran Cañón de Marte Valles Marineris.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

12. Supervolcanes: los gigantes de lava

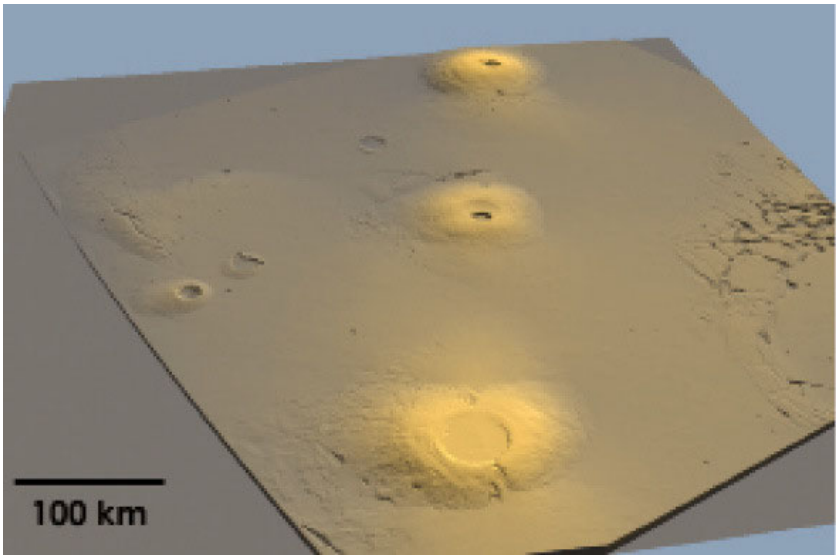
Muchos de los volcanes marcianos tienen una estructura colosal, sin análogos terrestres. El Olympus Mons (→45) es considerado como el mayor volcán conocido del sistema solar, con 25 km de altura y 600 km de diámetro. Tiene una caldera en la parte somital de 80 km de anchura, sin parangón en la Tierra. No obstante, Olympus Mons es superado por Alba Patera (→52) como el edificio volcánico de mayor superficie en el sistema solar. Este es otro volcán en escudo (un tipo de gran volcán formado por la superposición de coladas sucesivas de lava de baja viscosidad) situado también en el domo volcánico de Tharsis y, aunque solo tiene 6 km de altura, posee un diámetro de 1.600 km. También en el domo está la perfecta alineación de los Tharsis Montes (figura 14), formada por los supervolcanes Arsia Mons, Pavonis Mons y Ascraeus Mons, con altitudes de 16, 14 y 18 km, respectivamente, y diámetros en torno a 100 km.

Otros volcanes en este domo, aunque también gigantes en comparación con los terrestres, no son tan enormes. Varios de ellos se pueden ver en la figura 14, a la izquierda de los Tharsis Montes. Por otra parte, fuera de este domo de Tharsis (→26), que en sí mismo puede considerarse como una provincia volcánica colosal, está la provincia volcánica de Elysium (→53), con el supervolcán Elysium Mons, de 13 km de altura y 500 km de diámetro y una caldera en la cúspide de 14 km de diámetro. Todas estas cifras de las dimensiones de los volcanes en escudo de Marte dejan pequeños a los mayores volcanes de la Tierra. Así, el Mauna Loa, en Hawái, el mayor volcán de la Tierra, tiene 4 km de altura (sobre el nivel del mar) y 40 de diámetro.

¿Por qué son tan grandes los volcanes en Marte? Parece ser que la ausencia de una tectónica de placas como la terrestre hace que un gigantesco punto caliente (hot spot) pueda permanecer en el mismo lugar durante un largo periodo de tiempo (geológico) y, si hay una conexión con la superficie, se puedan emitir ingentes cantidades de

lava que pueden formar volcanes gigantes y grandes placas de lava (→53).

Figura 14



La imagen muestra, en la parte central, los Tharsis Montes, tres volcanes gigantes alineados. Desde la parte inferior de la imagen hacia la parte superior se observa Arsia Mons, Pavonis Mons y Ascraeus Mons, con altitudes de 16, 14 y 18 km, respectivamente. Puede observarse cómo Arsia Mons presenta una caldera espectacular de casi 50 km de anchura.

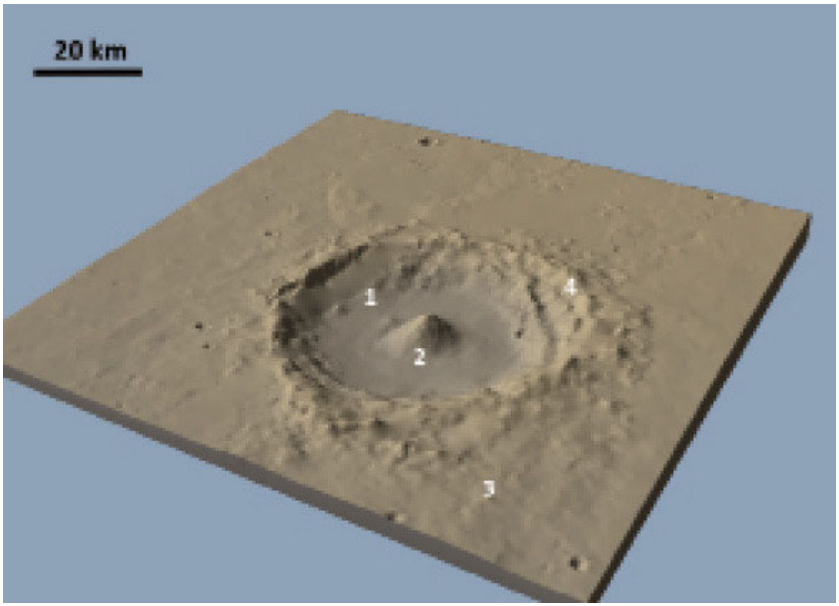
Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

13. Cráteres de impacto de meteoritos

Los cráteres de impacto son la estructura geológica más reconocible no solo de la superficie de Marte, especialmente en el hemisferio sur, sino de la Luna, Mercurio y otros cuerpos celestes del sistema solar. Curiosamente, no es una estructura geológica que se forme por la geodinámica interna o externa del planeta, sino por la interacción a lo largo del tiempo —en este caso, los impactos mecánicos— con otros cuerpos del sistema solar. En efecto, los cráteres de impacto forman unas depresiones características (número 1 en la figura 15) por el choque con meteoritos que viajan a una velocidad muy elevada y que cruzan su trayectoria con la del planeta. El impacto llega a ser tan violento que generalmente produce la vaporización del propio meteorito y la fusión de las rocas del sustrato. Como resultado de esto, se generan una onda de choque y un cambio brusco de presión que hacen que surga un pico montañoso en la parte central del cráter (número 2 en la figura 15). Obviamente, se produce la eyección de roca del lugar del impacto, formándose una capa de material que bordea el cráter (material eyectado, número 3 en la figura 15). En principo, se produce una depresión con bordes escarpados, por lo que son frecuentes los deslizamientos posteriores del material de las paredes (número 4 en la figura 15). Con el tiempo, los cráteres se llegan a erosionar y pierden la estructura típica de la figura 15, quedando simplemente la depresión o cráter, como se puede ver en la figura 16 (pág. 44).

La densidad de cráteres de una superficie se ha utilizado para su datación (→15). Los cráteres de impacto de tamaños muy grandes (varios miles de kilómetros) se denominan “cuencas de impacto” (→17). Se cree que la dicotomía hemisférica de Marte (→6) pudo formarse por el impacto con un meteorito de muy gran tamaño. Aunque la Tierra ha pasado por las mismas fases de bombardeo de meteoritos que el resto de cuerpos del sistema solar, la tectónica de placas y la erosión han borrado el rastro de la mayor parte de los cráteres de impacto antiguos, conservándose tan solo un puñado de los más recientes.

Figura 15



Cráter de impacto relativamente moderno, ya que todavía no ha sido muy erosionado

y conserva la estructura típica de un cráter de impacto reciente, con la depresión

cerrada o cráter interior (1), la elevación central (2), el material eyectado (3)

y los deslizamientos en los bordes (4).

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

14. El principio de superposición en geología: aplicación a la superficie de Marte

El principio de superposición de los estratos, formulado por Nicolás Steno en el siglo XVII y que permite la datación relativa de eventos y formaciones geológicas en la Tierra, tiene también su aplicación en Marte. Dicha datación permite decir qué evento (o, en su caso, formación geológica) es más antiguo o más moderno con respecto a otros. El principio de superposición afirma que las capas de rocas más antiguas se encuentran, originalmente, en posición inferior a las más recientes. De este modo, se puede hacer la datación relativa de cráteres que se intersectan, como los mostrados en la figura 16 (pág. 44), donde el cráter B es evidentemente más moderno que el cráter A, como se puede inferir utilizando implícita o explícitamente el principio de superposición de Steno. Este mismo razonamiento se puede extender a toda la superficie de Marte con respecto a la dicotomía hemisférica (→6), para concluir fácilmente que las tierras altas del hemisferio sur, saturado de cráteres de impacto, son más antiguas que las tierras bajas del hemisferio norte, que tienen muy pocos cráteres de este tipo.

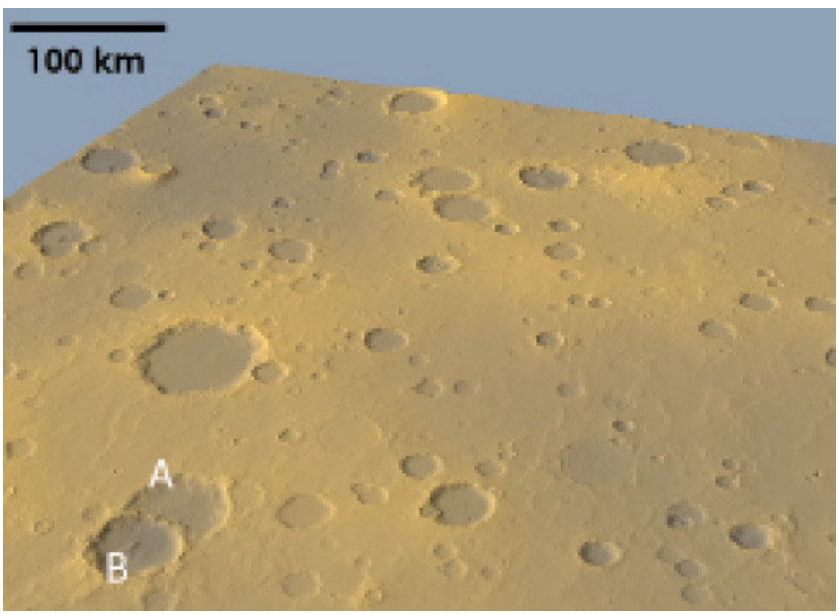
15. Datación de superficies mediante la densidad de los cráteres de impacto

La superficie de Marte, especialmente su mitad sur, está saturada de cráteres de impacto de una gran diversidad de tamaños (figura 16). La densidad de cráteres de una superficie, o el número de cráteres de impacto por unidad de área, es un índice morfométrico que se puede utilizar para la datación relativa entre superficies y también para una datación absoluta aproximada, esto es, para calcular la edad en miles de millones de años de una superficie.

El método se fundamenta en que en la actualidad los cráteres no están uniformemente distribuidos, existiendo un mayor número de estos en unas unidades del terreno que en otras; y, por otra parte, la densidad de cráteres se puede considerar similar para la Luna y para Marte. Para la primera se han podido datar de modo absoluto, por métodos radiométricos, muestras de rocas obtenidas en los proyectos Apolo de la NASA y en las misiones Luna de la antigua Unión Soviética. Se conoce la localización geográfica de dichas rocas y se ha calculado la densidad de cráteres de impacto de dichas localizaciones. De este modo, se puede construir una relación entre densidad de cráteres y edad geológica. En particular, para este método de datación se ha considerado la densidad de los cráteres mayores de 5 km. En Marte se han catalogado alrededor de 42.000 cráteres mayores de 5 km, aunque hay muchos más cráteres de impacto de menor tamaño que no se han considerado. De este modo, resulta obvio que la densidad de cráteres del hemisferio norte es mucho menor que la densidad de cráteres del hemisferio sur (figura 6, pág. 27) lo que nos permite afirmar que la superficie del primero es geológicamente más moderna que la del segundo. Hay que pensar que los impactos de cráteres durante la última etapa de mayor bombardeo (Late Heavy Bombardment, LHB), hace 3.800 millones de años, afectaron por igual a todo el planeta. Por consiguiente, si la mayoría de los cráteres de impacto han desaparecido del hemisferio norte, significa que se debió a procesos geológicos posteriores a dicha fecha y, por consiguiente, dicha

superficie es más moderna. Esta datación relativa (es decir, deducir cuál es más moderno y cuál más antiguo) entre hemisferios se puede extender a las superficies de estos: aquellas con mayor densidad de cráteres son más antiguas que las que tienen una menor densidad. Obviamente, el método no está exento de problemas, como la identificación de los propios cráteres utilizando las imágenes enviadas por las sondas espaciales o los modelos digitales de elevaciones del terreno a partir de los datos MOLA (→40).

Figura 16



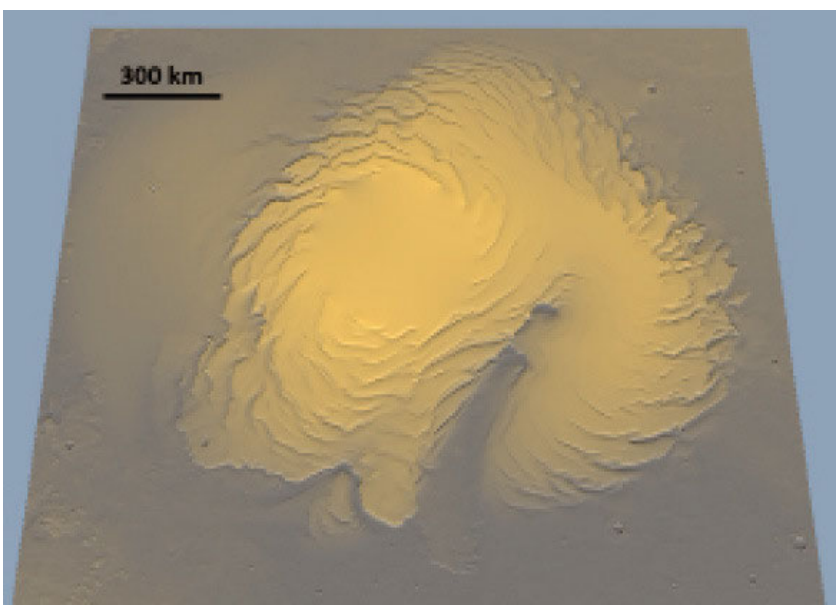
La figura muestra una superficie del hemisferio sur de Marte saturada de cráteres de impacto. Se observa una generación de cráteres más modernos y bien definidos, y una segunda generación de cráteres muy erosionados que dejan una silueta tenue en el terreno.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

16. Casquetes glaciares en los polos del planeta

En Marte, como en la Tierra, en latitudes muy altas cercanas a los dos polos geográficos del planeta, e incluyendo a los mismos, hay casquetes polares. Estos casquetes son grandes masas de hielo que cubren el terreno y que pueden alcanzar un espesor considerable. Se ha estimado que el casquete polar norte tiene un espesor de unos 3 km y se piensa que el sur tiene un espesor mayor, aunque desconocido.

Figura 17

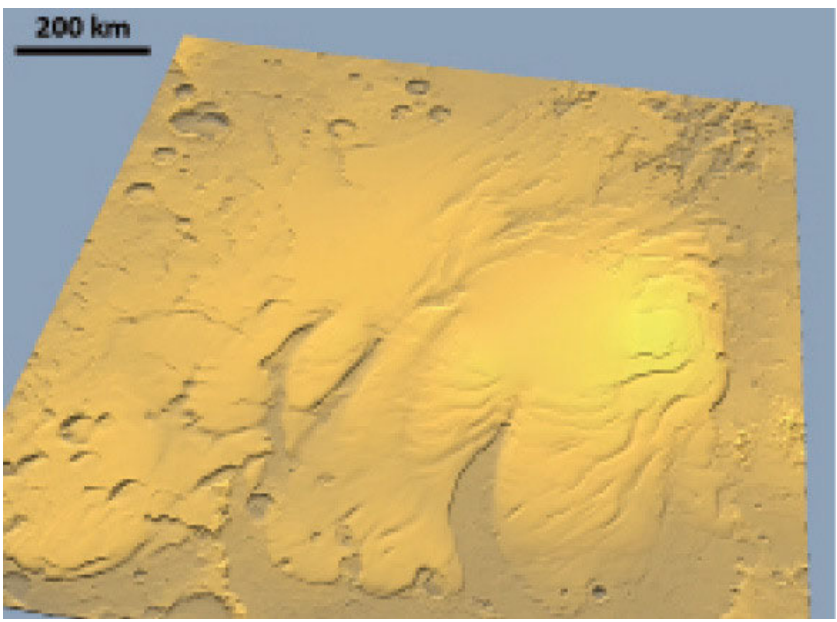


Casquete polar en el polo norte.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

En las figuras 17 y 18 se muestran ambos en su estado aproximadamente residual, es decir, con el tamaño mínimo que se alcanza en el verano respectivo de cada polo y que no desaparece. En el invierno de cada polo, los tamaños de estos casquetes se incrementan. Se puede observar en las figuras cómo el casquete del norte, con un diámetro de unos 1.000 km, es bastante mayor que el del sur, de unos 400 km.

Figura 18



Casquete polar en el polo sur.

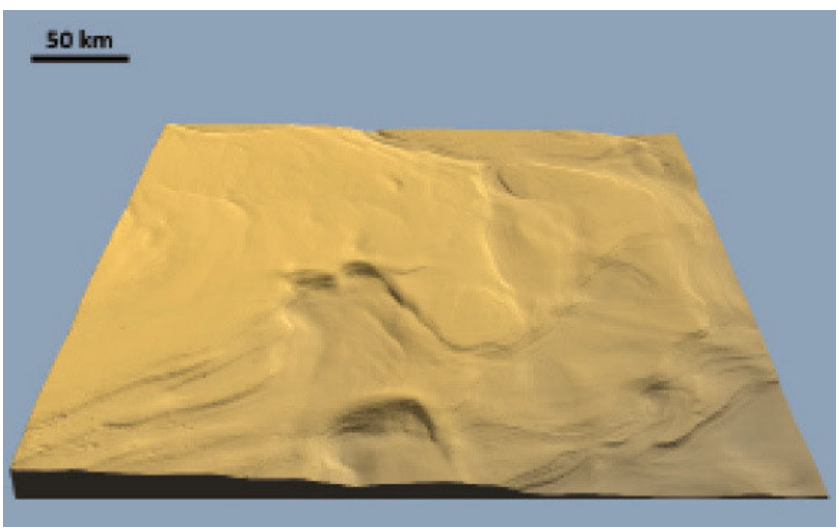
Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

A diferencia de la Tierra, donde los casquetes polares están formados por agua helada, en Marte están compuestos en su mayor

parte de hielo seco, es decir, CO2 en estado sólido; aunque también hay agua helada en menor proporción. Vistos en más detalle, se puede observar cómo están formados por depósitos bandeados compuestos principalmente por capas de hielo con cantidades variables de polvo y que se conocen como “depósitos bandeados polares” (polar layered deposits o PLD). Estos depósitos están cortados por cañones gigantes que permiten observar su estructura interna (figura 19).

Como se ha dicho, los casquetes polares marcianos también tienen una dinámica de avance y retroceso. De este modo, en el invierno de un polo el casquete polar crece porque al descender la temperatura parte del CO2 atmosférico, en estado gaseoso, pasa a ser hielo seco sobre el casquete polar. Por el contrario, en la estación de verano, cuando suben las temperaturas, el hielo seco se sublima (cambia directamente de sólido a gas sin pasar por la fase líquida) e incrementa la densidad de la atmósfera al aumentar su contenido en CO2.

Figura 19



Vista en detalle de los depósitos bandeados (estratificados) del

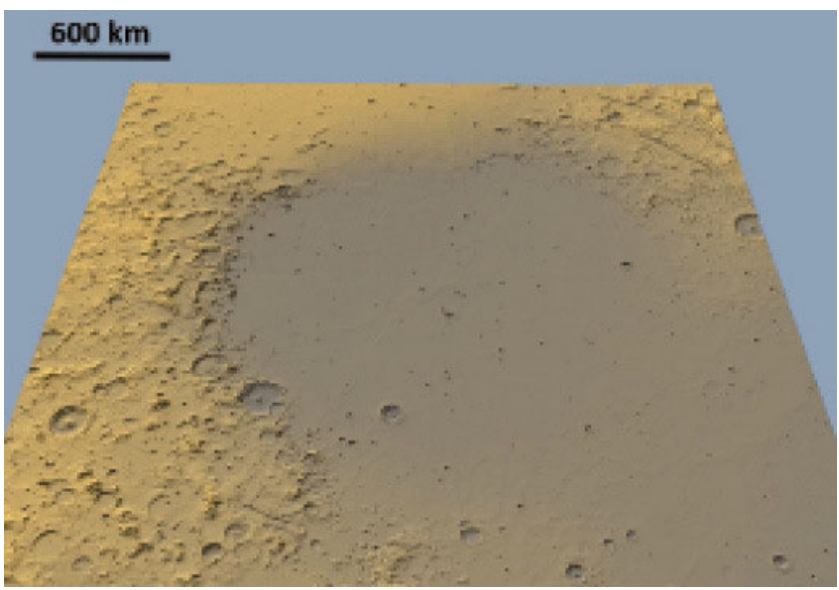
polo sur de Marte.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

17. Cuencas de impacto

Sobre la superficie de Marte hay toda una gradación de tamaños de cráteres de impacto (figura 16, pág. 44). En ocasiones, el meteorito que impactó sobre la superficie de Marte fue de tal magnitud que originó una depresión en el terreno de dimensiones tan grandes que constituye una enorme cuenca endorreica que recibe el nombre de cuenca de impacto. En el mapa topográfico de Marte (figura 6, pág. 27) se distinguen claramente las de Hellas Planitia (HP) (→32), Argyre Planitia (AP) (→48) e Isidis Planitia (IP). Utopia Planitia (UP) y Chryse Planitia (CP) también parecen ser antiguas cuencas de impacto. Y la mayor de todas, Borealis Planitia (BP) (→20), que se cree fue el origen de la dicotomía hemisférica (→6) de Marte.

Figura 20



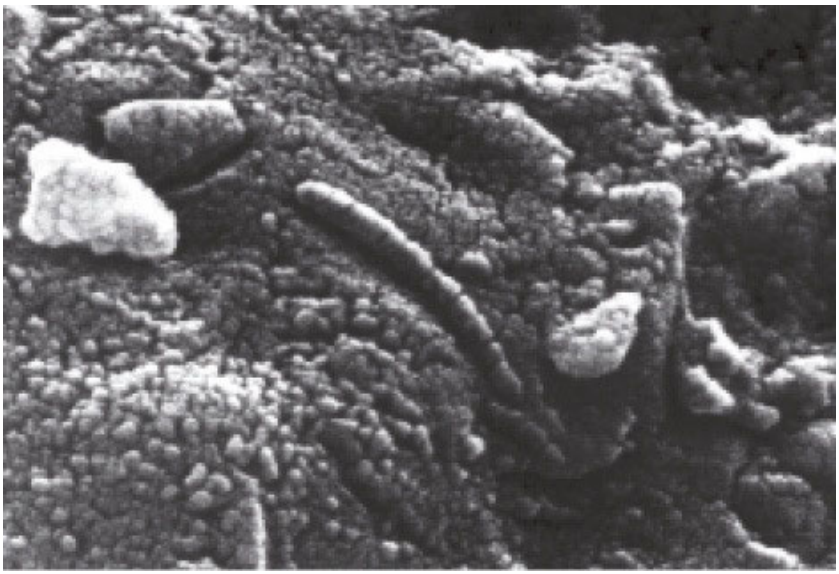
Cuenca de impacto de Isidis Planitia.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

18. ALH84001: un meteorito polémico

ALH84001, o Allan Hills 84001, que es en realidad su nombre oficial, es un meteorito de origen marciano encontrado en la Antártida en el año 1984 por un equipo de investigadores norteamericanos que prospectaban la región de Allan Hills. Este meteorito ha creado gran controversia en los medios científicos, al haberse encontrado en su interior formaciones semejantes a las originadas por algunas bacterias (figura 21), que sugerían la posible existencia de vida en Marte. Se estima que se formó en Marte hace unos 4.500 millones de años; con posterioridad, el impacto de otro meteorito en Marte expulsó al ALH84001 fuera del planeta, que acabó cayendo en la Tierra hace unos 13.000 años.

Figura 21



Fotografía de alta resolución realizada con un microscopio electrónico de barrido

que muestra una estructura tubular en el centro de la imagen y que se encontró

en el meteorito ALH84001. El tamaño de dicha estructura es menor a una centésima

parte de la anchura de un cabello humano.

Imagen: NASA.

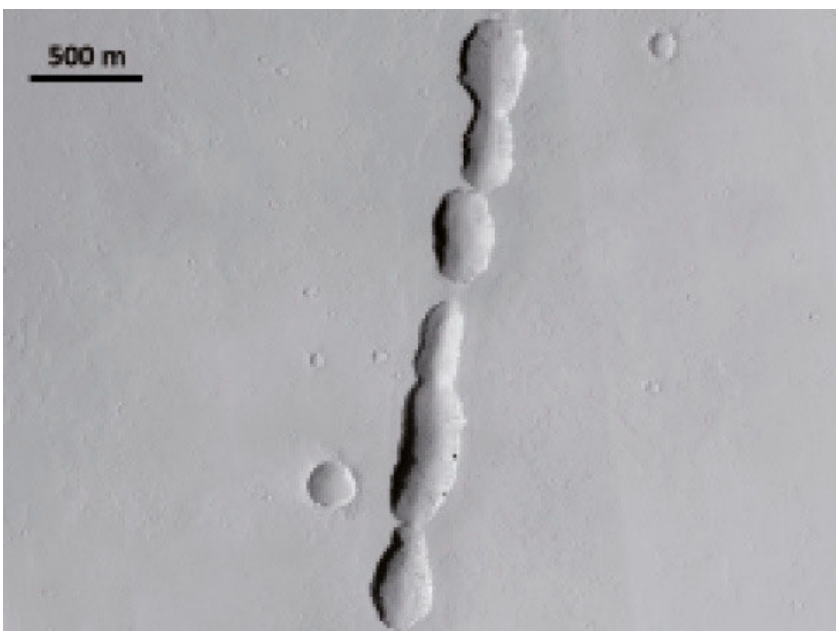
Se conoce la procedencia del meteorito porque contiene un isótopo del nitrógeno en cantidades muy similares a las halladas en la atmósfera de Marte y que no se ha encontrado en otros lugares del sistema solar. También hay pruebas en contra de que sea un indicio de vida en Marte, como son el posible origen inorgánico de la estructura tubular (figura 21) y la demostración de que el meteorito está contaminado por el hielo de la Antártida, donde se encontró. Aunque se clasificó originalmente como una diogenita, hay varios rasgos petrológicos que indican lo contrario. Su nueva clasificación es la de un inusual meteorito de tipo SNC (Shergottitas, Nakhlitas y Chassignitas): una ortopiroxenita SNC. Es uno de los más de 39.000 meteoritos de la Antártida (el lugar donde más meteoritos se han hallado en la Tierra) oficialmente reconocidos y clasificados por la Meteoritical Society.

19. Depresiones de colapso en embudo

(collapse pits)

En Marte se pueden encontrar diferentes tipos de depresiones cerradas del terreno: cráteres de impacto (→13), calderas volcánicas (→26) y simas o claraboyas de cuevas, formadas por hundimiento del techo de las mismas (→29). Un cuarto tipo de depresiones cerradas son las de colapso en embudo (figura 22).

Figura 22



Cadena de depresiones de colapso cerca de Olympica Fossae. Parece tratarse de colapsos

del material granular de la superficie marciana a lo largo de un conducto de lava.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

Este tipo de depresiones pueden encontrarse aisladas o formando cadenas de depresiones y se caracterizan porque sus paredes internas tienen una pendiente hacia el interior de la misma, con un ángulo de reposo de unos 30º. La formación de la depresión parece ser el drenaje de material no consolidado (regolito superficial →35) hacia el interior de fracturas o fallas, que pueden alcanzar una profundidad considerable. Otros autores asocian estas depresiones a la intrusión de diques o al colapso de cámaras rellenas de magma. Se ha estimado que en el subsuelo debe de haber grandes cavidades, con el volumen suficiente para acomodar todo el material drenado, que puede llegar a ser de decenas de km^3 de regolito en cada depresión.

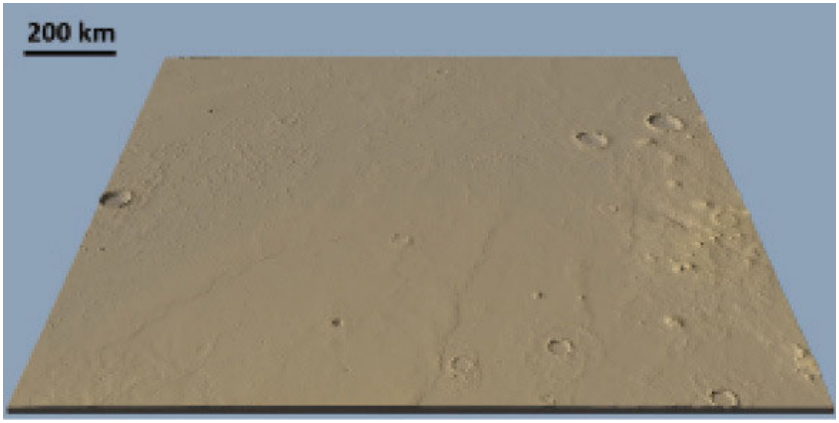
20. La cuenca Borealis: las enigmáticas

llanuras del norte de Marte

En la dicotomía hemisférica (→6) de Marte, las tierras bajas del norte del planeta (la cuenca Borealis) están formadas por llanuras que constituyen los terrenos más planos conocidos del sistema solar. Aunque no hay rasgos topográficos sobresalientes, si exceptuamos el casquete glaciar del polo norte y los escasos y relativamente modernos (en relación al hemisferio sur) cráteres de impacto, los investigadores en geología planetaria han observado que estas llanuras están atravesadas por unas estructuras constituidas por alineaciones de bordes o crestas. Una hipótesis es que estas llanuras estuvieron una vez cubiertas por un océano y las lineaciones son paleolíneas de playa. Otra posibilidad es que sean rasgos de origen tectónico o volcánico. Hay que tener en cuenta que casi todas estas crestas parecen estar relacionadas con el domo volcánico de Tharsis (→26) o con la cuenca de impacto de Utopía (figura 6, pág. 27) y tienen una dirección perpendicular a las direcciones predecibles de máximo esfuerzo compresivo. Por consiguiente, parece que su origen podría estar relacionado con un régimen de tectónica compresiva.

Estudiadas en perfil, estas lineaciones tienen una zona plana (terraza), con un resalte en la zona de cabecera (pendiente arriba) cuando se asocian a flujos de lava en volcanes, mientras que la terraza está seguida de un resalte pendiente abajo cuando se trata de rasgos de tectónica compresiva. Rasgos parecidos se encuentran en placas volcánicas que sufren transporte tectónico, como Syria Planum (figura 29, pág. 64) en el domo de Tharsis. Se cree que la cuenca Borealis pudo ser el producto del impacto de un meteorito gigante (→6), aunque no está reconocida, por ahora, como cuenca de impacto por la Unión Internacional de Astronomía.

Figura 23



Lineaciones en la cuenca Borealis del norte de Marte. La escala vertical se ha exagerado

un 650 por ciento para poder revelar los rasgos topográficos de una zona muy plana.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

21. Hidrogeología de Marte

Aunque en algún momento del pasado geológico de Marte pudo haber un océano (→5) sobre su superficie, durante la mayor parte de su historia geológica Marte ha tenido una hidrosfera en el subsuelo formada casi exclusivamente por agua subterránea. También, debido a las bajas temperaturas de la superficie del planeta, al menos para las capas más superficiales, el agua habrá estado y estará congelada, formando, en consecuencia, una criosfera. Esta actúa como material confinante de la hidrosfera subyacente que, por consiguiente, formará un acuífero confinado con el agua a sobrepresión, ya que el agua al congelarse incrementa su volumen. Asimismo, dicha sobrepresión aumentará la fracturación hidráulica en la criosfera e hidrosfera. De este modo, por alguna de esas fracturas se puede establecer algún conducto preferente que establezca una conexión entre la hidrosfera y la superficie del planeta en forma de volcanes de lodo (→59). Debajo de dichos volcanes puede existir un sistema de cavernas (→60) por drenaje del fluido en los conductos que alimentan al volcán de lodo. Así, se producirá un descenso del nivel piezométrico en la hidrosfera subterránea. Por otra parte, en la formación del domo volcánico de Tharsis se produjo una intrusión de magma a gran escala que produjo gigantescas inundaciones (→9) de agua procedentes de la hidrosfera y de la criosfera. Fue la mayor salida súbita de agua subterránea conocida en el sistema solar.

Otros indicios de agua procedente del subsuelo, a una menor escala, son los rezumes desde puntos oscuros en dunas (→50) y las líneas recurrentes en laderas (→55).

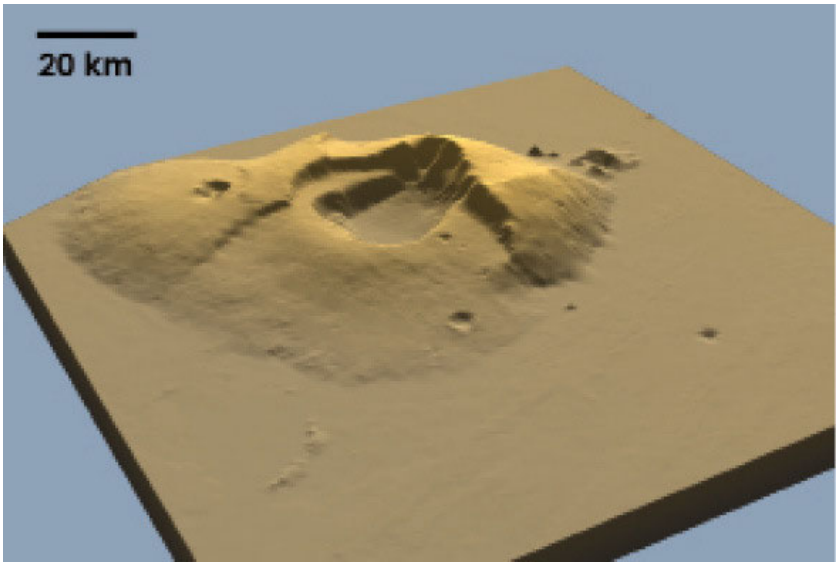
22. Tharsis THOLUS: un espectacular volcán extendido (spread volcano)

Conforme un volcán crece y se hace más grande, se vuelve, lógicamente, más pesado. Además de estar constituido por materiales poco consolidados, el sustrato sobre el que se apoya puede estar formado por sedimentos poco litificados que pueden consolidarse simplemente por el peso del edificio volcánico que soportan. Por ello, puede suceder que se produzca una fracturación del edificio volcánico por algunas fallas, con un desplazamiento lateral de los bloques generados por las mismas. Así se forman los volcanes extendidos, que incrementan su dimensión horizontal y la superficie que ocupan por el mecanismo previamente mencionado. Dicho tipo de volcanes son frecuentes en la Tierra, pero se presentan ejemplos espectaculares en Marte, como Tharsis Tholus (figura 24).

Su edificio volcánico tiene un diámetro de 140 km y su caldera un diámetro de 30 km. El volcán presenta escarpes de fallas que han agrandado su tamaño en planta por la extensión lateral de grandes bloques del mismo. Está rodeado por lavas más modernas, que esconden parte de las evidencias de la extensión del volcán y del sustrato. En la figura 24 se pueden observar los dos mecanismos principales que controlan la extensión del edificio volcánico: fallado geológico y flujo de material o traslación de los bloques delimitados por las fallas.

El proceso de extensión no es un proceso eruptivo y el colapso de la cima, asociada con la formación de la caldera, tampoco contribuye a la expansión. En efecto, los volcanes son estructuras complejas, no simples chimeneas por donde emergen lava y gases. La extensión se produce por la energía potencial del edificio volcánico, que ha ido ganando altura y se ha vuelto pesado e inestable. El domo volcánico de Tharsis (→26) tomado en su conjunto también podría considerarse un edificio volcánico de extensión.

Figura 24



Vista tridimensional de Tharsis Tholus, un bonito volcán de extensión en Marte.

Se observan los escarpes de falla netos que han fracturado el edificio volcánico

y han permitido la expansión lateral de bloques del mismo.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

23. Agua y vida en Marte

Con las condiciones actuales de presión y temperatura en la superficie de Marte, no puede haber agua líquida en su superficie. Sin embargo, hay evidencias de que estacionalmente pueden existir efímeros regueros de agua en las laderas de ciertos relieves (→55) o de algunas dunas (→50). Se cree que hay una hidrosfera en el subsuelo por debajo de una criosfera que actúa como confinante de la anterior (→21). También parece claro que Marte albergó agua líquida en el pasado. De hecho, pudo existir un océano (→5) y también hay vestigios de canales de drenaje, redes fluviales, depósitos lacustres y depósitos deltaicos que han debido de requerir de la presencia de agua.

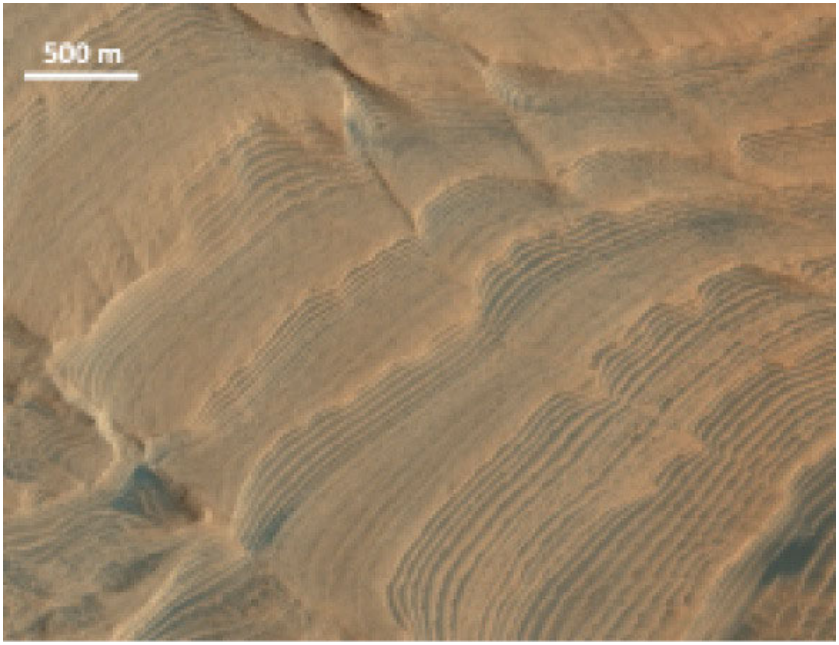
La existencia, pasada o presente, de agua en Marte abre expectativas sobre la existencia actual o pretérita de vida en dicho planeta. Sin embargo, aparte del polémico meteorito ALH84001 (→18), todavía no se han encontrado evidencias concluyentes de vida actual o pasada.

24. Ciclos de Milankovitch en Arabia Terra

Arabia Terra (AT en la figura 6, pág. 27) es una región de Marte que representa una transición gradual entre las tierras altas del sur y las tierras bajas del norte. En esta región hay abundantes afloramientos de depósitos sedimentarios que aparecen en el interior de cráteres y que presentan un bandeado rítmico que indicaría la influencia orbital (ciclos de Milankovitch) en su formación. Es decir, esto indicaría que dichas secuencias se depositaron a lo largo de un considerable intervalo de tiempo, del orden de millones de años, lo que permitiría concluir que en el pasado hubo condiciones diferentes del ambiente frío y seco actual.

De entre los ciclos de Milankovitch, el ciclo de oblicuidad de Marte se ha considerado como el más importante para dirigir el cambio climático. La oblicuidad de Marte —la inclinación de su eje de rotación— cambia con una periodicidad de 120.000 años, mientras que en la Tierra la oblicuidad tiene una periodicidad de 41.000 años, el denominado ciclo de Milankovitch de oblicuidad. Analizando estos depósitos bandeados utilizando estereoimágenes de alta resolución propocionadas por la cámara HiRISE (→44), se ha observado que los ciclos de oblicuidad se agrupan en secuencias de 10, lo que implica una modulación de 1,2 millones de años en lo que pudiera ser un ciclo de excentricidad de la órbita del planeta. En cuanto a la formación de estos depósitos, todavía es desconocida. Podrían ser depósitos eólicos, pero se necesitaría información adicional de los mismos, ya que las imágenes disponibles no son suficientes para confirmarlo. Se asume que se debió requerir agua para la litificación (consolidarse y convertirse en roca) de estos depósitos. De este modo, la hipótesis orbital implica la presencia de un ciclo hidrológico al menos durante unas decenas de millones de años.

Figura 25



Sucesión de estratos de rocas sedimentarias en el cráter Becquerel. La secuencia muestra

una ciclicidad de capas de diferente espesor. Se observan resaltes de erosión diferencial

por la diferente resistencia de los estratos de acuerdo a su composición. La dirección

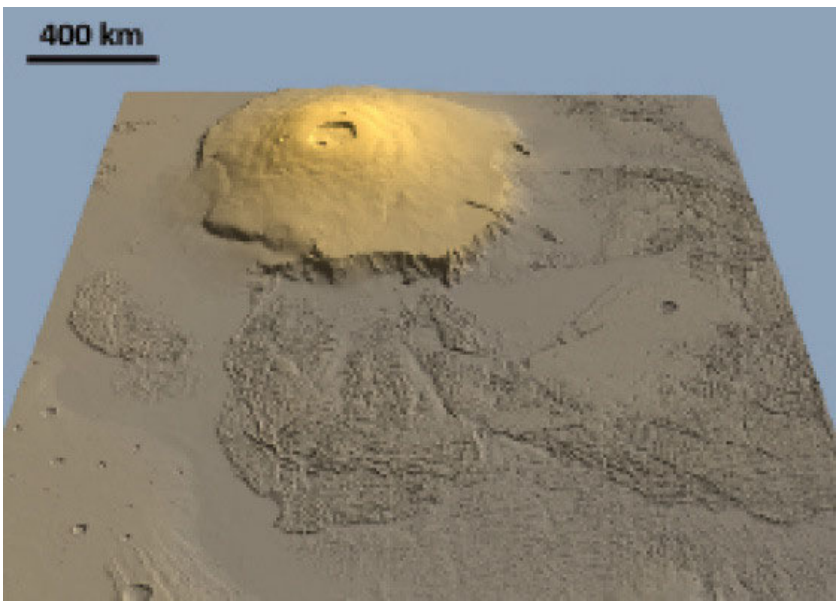
de estratificación es N45ºE y el buzamiento (aplicando la regla de la V) es hacia el SE, asumiendo que el norte está en la parte superior de la figura.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

25. Lahares en Marte

Un lahar es un flujo en masa formado por una mezcla de agua y sedimento que está directa o indirectamente relacionado con el volcanismo. En Marte hay lahares gigantescos asociados a los grandes volcanes, como Olympus Mons (figura 26) o Elysium Mons (figura 27). Por consiguiente, implican un gran movimiento de masa, cuyo motor es la gravedad y que está lubricado por agua. En el caso del Olympus Mons, el lahar se solapa con un gigantesco deslizamiento de ladera, cuyo detonante pudo involucrar al agua subterránea y que ha dejado un acantilado de 2 km con respecto a la superficie circundante.

Figura 26

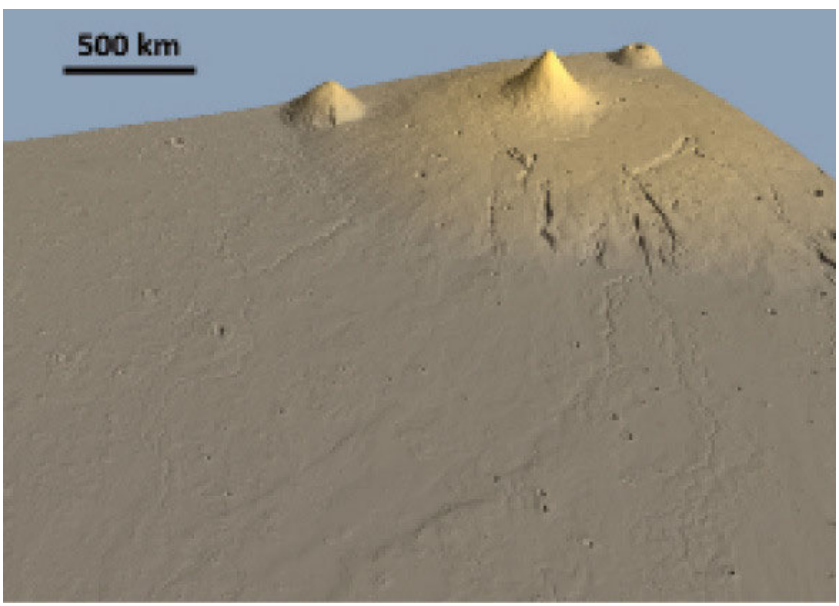


Gigantesco deslizamiento asociado a una de las laderas del volcán Olympus Mons.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

En el caso del Elysium Mons, se observa en la figura 27 el lahar de Granicus Valles, en primer término, con canales sinuosos sobre el depósito de lahar, con tenues lóbulos. Esto demuestra un rasgo típico del lahar, además de su origen volcánico y el movimiento inducido por la gravedad, la característica de ser flujos de detritos húmedos, con agua.

Figura 27



Parte de un gigantesco lahar (en primer término) asociado a la región del volcán Elysium

Mons (en la parte central) y los volcanes Hecates Tholus (a su

izquierda) y Albor Tholus

(a su derecha, en la esquina superior derecha). Se observan canales sinuosos que

recorren el lahar, así como fracturas abiertas. La figura tiene una exageración vertical

del 950 por ciento para destacar los rasgos del lahar.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

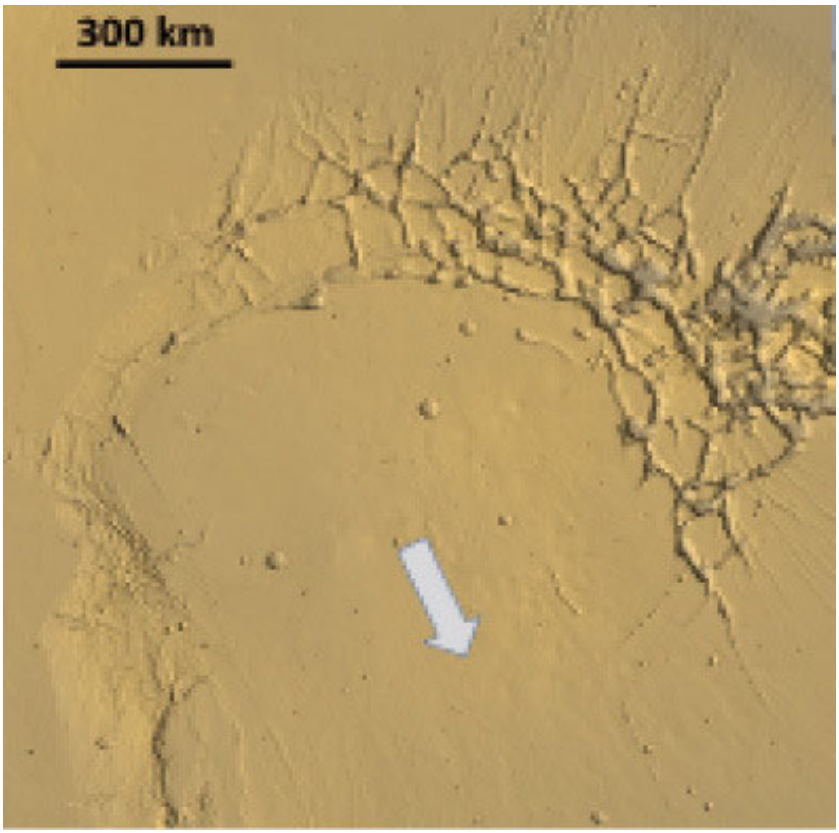
26. El domo volcánico de Tharsis:

una superestructura volcánica

El domo volcánico de Tharsis (figura 6, pág. 27) es un complejo edificio volcánico que ha ido evolucionando con los efectos propios de la tectónica volcánica, por lo que también se podría denominar con propiedad "domo tectónico-volcánico" o "tectovolcánico" de Tharsis. Presenta unas dimensiones colosales, con un diámetro de 6.000 km. Se encuentra centrado sobre el ecuador de Marte, a una longitud de 110º oeste y tiene una elevación media de más de 10 km (sin considerar las cumbres de sus supervolcanes →12) con respecto a las tierras bajas del norte y más de 4 km con respecto a las tierras altas del sur. El domo incluye el mayor edificio volcánico simple del sistema solar (Alba Patera →52), el mayor volcán del sistema solar (Olympus Mons →45), los volcanes gigantes alineados de los Tharsis Montes (→22) y otros volcanes gigantes. También comprende diversas fosas tectónicas, que son radiales respecto al domo, siendo Valles Marineris (con 3.000 km de longitud y dirección N110oE) la mayor de todas, y "placas volcánicas" como la de Syria Planum (figura 28), que se desliza hacia el SSE por transporte tectónico y forma un frente de cabalgamiento de una placa volcánica de lava sobre las tierras altas (figura 29).

El levantamiento y evolución del domo ha tenido una historia tectónica interesante, con un rifting NS, un fallado radial y plegamiento tangencial en relación al transporte tectónico de placas volcánicas por efecto de la gravedad y del empuje magmático del punto caliente interior al domo. El domo tectovolcánico de Tharsis, tomado en su conjunto, puede ser considerado un "volcán de extensión" (→22) y así se ha estudiado, comparándolo con las estructuras del volcán Etna en Sicilia (Italia), que puede considerarse como un modelo a escala de este domo marciano.

Figura 28



El origen de la placa volcánica de Syria Planum se produjo por un abombamiento

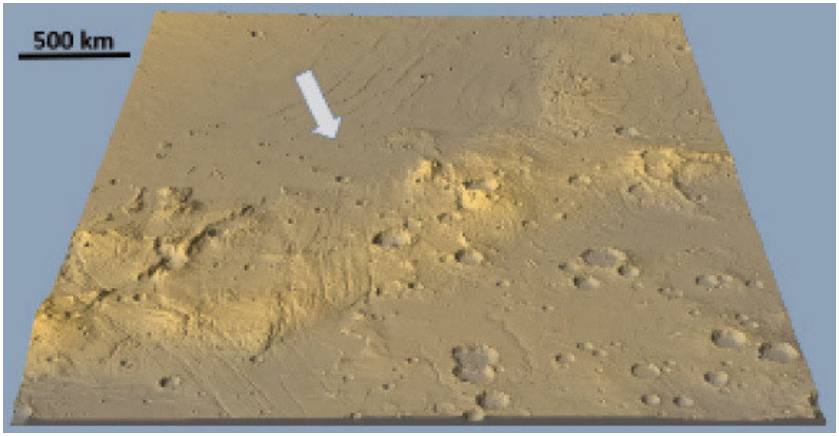
ante el empuje magmático del interior, lo que la hizo desplazarse hacia el SE, formando

un frente de cabalgamiento de la placa volcánica sobre las tierras altas del sur (figura 29).

En la parte superior derecha se produce el comienzo de la fosa tectónica de Valles Marineris.

Imagen: Eulogio Pardo en base a MOLA y 3DEM.

Figura 29



Frente de cabalgamiento de dirección N45ºE de la placa volcánica

de Syria Planum sobre las tierras altas del Sur.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

27. ¿Placas tectónicas en Marte

o un planeta de placa única?

No hay evidencias de que Marte esté experimentando actualmente procesos de tectónica de placas similares a los terrestres. De este modo, cabe pensar que toda la corteza de Marte es una única placa tectónica o que, visto de otro modo, no tiene placas tectónicas. ¿Se requiere la presencia de corteza de tipo oceánica para la tectónica de placas? ¿Se enfrió Marte muy rápido debido a su menor tamaño que la Tierra y, por consiguiente, su mayor ratio superficie/ volumen?

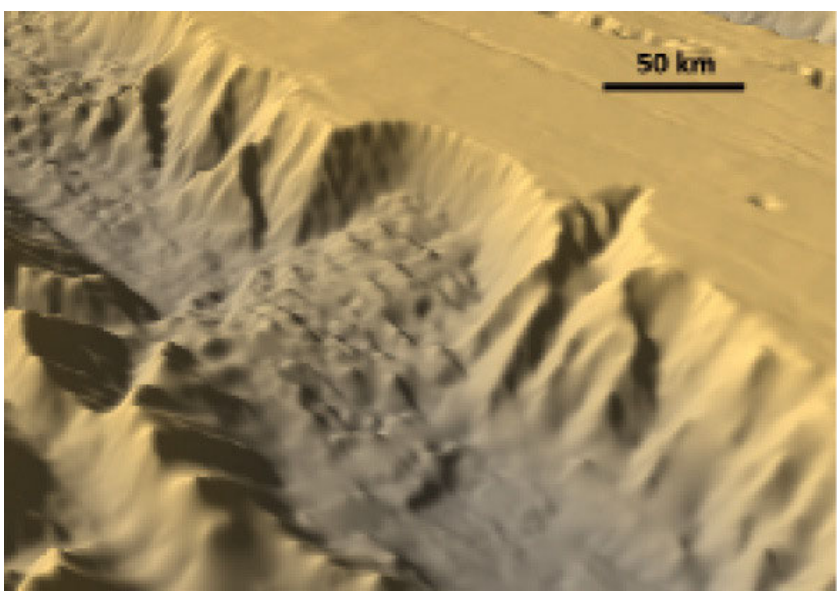
Sobre la superficie de Marte se han encontrado rasgos que se han interpretado como indicadores de tectónica de placas en el pasado, como los patrones paleomagnéticos (→41) encontrados por la sonda espacial Mars Global Surveyor. Aunque, por otra parte, el tamaño gigantesco de los volcanes de Marte, como el Olympus Mons (→45) se interpreta como evidencia de que la corteza se ha mantenido estacionaria sobre una fuente de magma durante un periodo de tiempo muy largo, lo que indicaría una ausencia generalizada de actividad de placas tectónicas.

28. Geomorfología marciana: mismas formas,

distintos lugares

En Marte encontramos varios tipos de aspectos geomorfológicos característicos que conforman la superficie del planeta. Las formas del relieve más características son los cráteres de impacto (→13) y las cuencas de impacto (→17), que conforman la geomorfología de las tierras altas del sur y son depresiones del terreno con su propia estructura (→13). Por otra parte está la geomorfología de llanuras de las tierras bajas del norte (→20) del planeta.

Figura 30



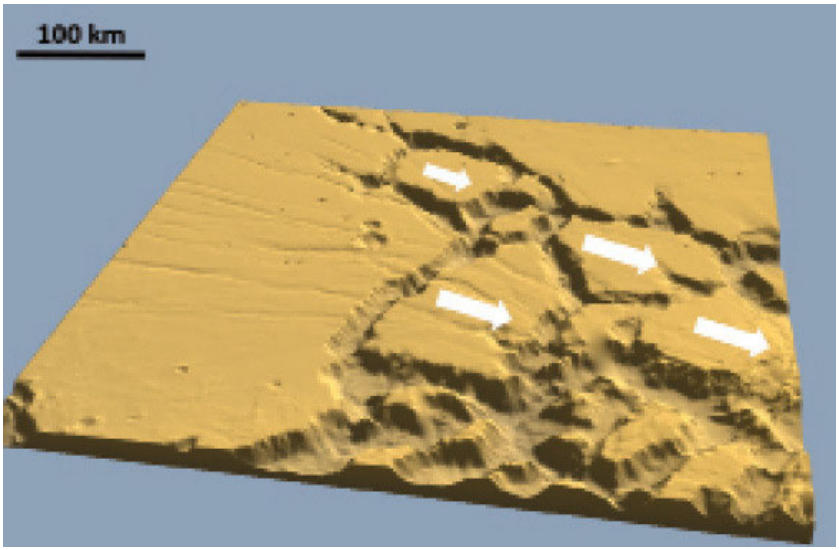
Deslizamiento rotacional, con fragmentación del material deslizado,

en el interior de Valles Marineris.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

Muy extendidas también son las morfologías volcánicas que se pueden encontrar en el domo volcánico de Tharsis (→26) y la provincia volcánica de Elysium (→53), así como las llanuras de inundación y de megacanales asociados ambos a gigantescas inundaciones (→9). También son importantes los rasgos geomorfológicos de cañones y fosas asociados al Gran Cañón Valles Marineris (→11), la morfología de megadeslizamientos relacionada con el domo volcánico de Tharsis y el Gran Cañón Valles Marineris, las morfologías glaciar y periglaciar de las zonas polares y circumpolares y la geomorfología eólica asociada al transporte de polvo y arena por el viento marciano. Los movimientos de laderas presentan gigantescos deslizamientos de tipo rotacional en las empinadas paredes del cañón Valles Marineris (figura 30) y de tipo traslacional en relación al levantamiento del domo de Tharsis en el área de la zona de fractura de Noctis Labyrinthus (figura 31).

Figura 31



Deslizamiento traslacional que forma un paisaje laberíntico con pasillos

entre bloques deslizados del terreno.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

La geomorfología glaciar está relacionada espacialmente con los casquetes polares (→16); en particular, se han identificado formas parecidas a glaciares y otras similares a eskers (figura 32). La geomorfología eólica se caracteriza por la amplia presencia de campos de dunas (figuras 48 y 52, págs. 103 y 115), como la morfología más típica del transporte de arena por el viento.

Figura 32

La figura muestra posibles eskers en Phlegra Montes. Un esker es la cresta larga y sinuosa que se observa en el centro de la figura y que está formada por sedimentos transportados

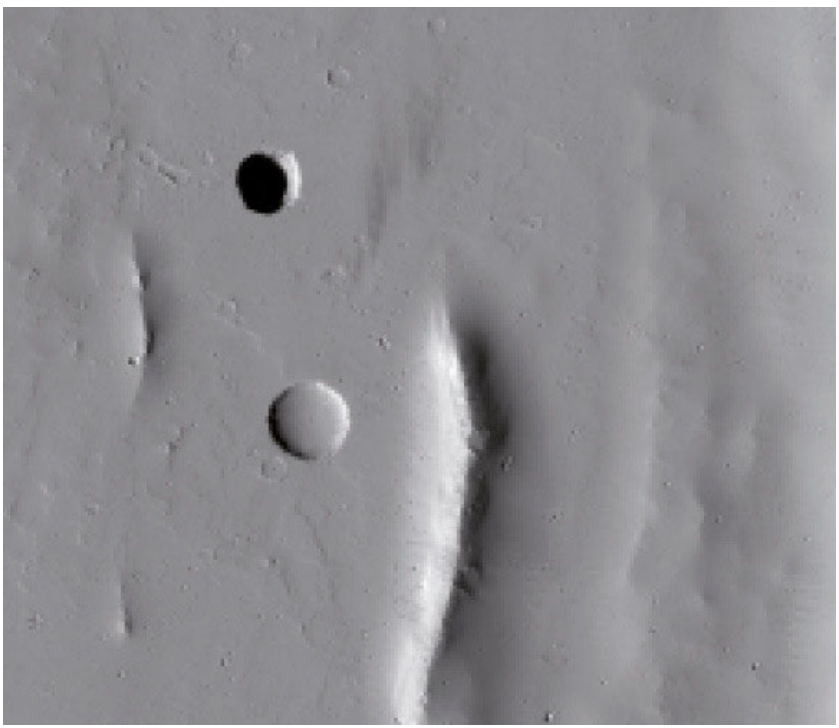
por ríos que corrieron por debajo de los glaciares.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

29. Cuevas en Marte: una ventana al futuro

Las cuevas, con sus diferentes orígenes, tanto físicos como químicos, son muy frecuentes en la Tierra y, a priori, no existirían razones por las que no puedan encontrarse en Marte. En efecto, se han tomado fotografías de lo que se intuye son entradas a cuevas en el planeta rojo (figura 33).

Figura 33



Fotografía de alta resolución tomada por la cámara HiRISE que muestra la sima

de colapso en Tractus Fossae, en la parte superior de la foto. Esta fosa está localizada

en la región volcánica de Tharsis. La sima se ha podido producir por el colapso del techo

de una cueva infrayacente. El diámetro de la sima es de unos 200 m.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

Las cuevas son estructuras geomorfológicas muy interesantes en la investigación espacial por ser lugares donde se podría buscar indicios de vida presentes o pretéritos y potenciales refugios de futuras misiones colonizadoras a Marte. Así, las cuevas debidamente acondicionadas proporcionarían protección contra las bajas temperaturas, la radiación solar, los impactos de micrometeoritos y las grandes tormentas de polvo que se producen en Marte.

El proceso más general para la formación de una cueva en Marte es el agrietamiento del material de la corteza, ya sea por presión del magma en relación a procesos volcánicos, esfuerzos tectónicos direccionales, fallas geológicas, impactos de meteoritos, etc. Otro importante mecanismo para la formación de cuevas en Marte son los tubos volcánicos donde, al igual que en la Tierra, la parte superior de un río de lava se solidifica, mientras que en la parte interior se produce el drenaje de la roca fundida con la consiguiente formación de la cavidad. También se podrían formar cuevas en Marte por la fusión y sublimación del hielo (agua y CO2) del subsuelo, por procesos similares a la sufusión (piping) en la Tierra. Por otra parte, todavía no se han confirmado cuevas kársticas por disolución química de roca karstificable (caliza, dolomía, yeso…), que son el tipo de cuevas más frecuentes en la Tierra. Para ello, sería todo un logro el confirmar la presencia de rocas carbonáticas o evaporíticas (→39) en la superficie o el subsuelo de Marte.

Un método para localizar cuevas en la Tierra y en Marte es utilizar imágenes térmicas —fotografías de la temperatura del terreno—, aprovechando la inercia térmica de las cavidades del subsuelo. De

este modo, las entradas de las cuevas mostrarán un contraste térmico con el entorno, dando una anomalía positiva (más calor) en invierno y una anomalía negativa (más frío) en verano. En este sentido, la cámara THEMIS (Thermal Emission Imaging System), a bordo de la sonda Mars Odyssey, proporciona imágenes en las bandas del espectro visible e infrarrojo térmico. La resolución espectral es de cinco bandas para el espectro visible y nueve bandas para el infrarrojo. La resolución espacial es de 18 m para el visible y 100 m para el infrarrojo. Las imágenes del infrarrojo térmico de THEMIS se han utilizado para localizar cuevas en Marte aprovechando la mencionada inercia térmica de las cavidades del subsuelo. Sin embargo, debido a la resolución espacial de estas imágenes, no se pueden detectar aperturas de cuevas de un tamaño menor a 100 m.

30. La misión InSight: estudio del interior del planeta

La misión InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) posó el 26 de noviembre de 2018 un aterrizador sobre la superficie de Marte: un auténtico laboratorio geofísico, cuyo objetivo es la toma de datos para el estudio del interior del planeta. Concretamente se quiere conocer el tamaño, composición y estado físico del núcleo, manto y corteza de Marte; determinar el estado térmico del interior del planeta; determinar la magnitud y distribución geográfica de la actividad sísmica en Marte, y medir el flujo de impactos de meteoritos sobre la superficie del planeta. El aterrizador ya ha registrado lo que podría ser el primer martemoto (→8), pues lleva instalado un sismómetro comparable a los mejores disponibles en la Tierra. Este ha sido diseñado para poder detectar impactos de meteoritos, cambios barométricos súbitos y tirones gravitatorios de Fobos, una de las lunas de Marte. El aterrizador InSight lleva muy poco tiempo sobre la superficie de Marte, por lo que, sin lugar a dudas, grandes descubrimientos, de gran interés para los geólogos, llegarán en un futuro próximo.

31. Las misiones Mariner: los pioneros

Entre 1962 y 1973, la NASA construyó diez sondas espaciales, denominadas Mariner, para explorar el sistema solar interno, visitando los planetas Venus, Marte y Mercurio por primera vez en la historia de la humanidad. En lo que respecta a Marte, la Mariner 3, lanzada en 1964, falló y no llegó a alcanzar el planeta rojo. Sin embargo, la Mariner 4, también lanzada en 1964, pasó cerca de este en 1965, tras un viaje de ocho meses, y tomó las primeras fotografías de la superficie de Marte que mostraron cráteres de impacto similares a los de la Luna. En 1969, las sondas Mariner 6 y 7, en una misión conjunta hacia Marte, sobrevolaron el ecuador y el polo sur de Marte, analizaron su atmósfera y tomaron cientos de fotografías. Por casualidad no se llegaron a observar algunos de los grandes rasgos geológicos del planeta, sin embargo sí que demostraron que los rasgos oscuros de la superficie de Marte, que se habían observado mucho antes desde la Tierra, no eran canales, como determinados autores habían creído.

Las Mariner 8 y 9 fueron el último par de sondas de la serie Mariner que la NASA dedicó a la investigación de Marte. La primera falló durante su lanzamiento en 1971. Sin embargo, la novena sonda, lanzada ese mismo año, llegó hasta la órbita de Marte, siendo el primer satélite artificial del planeta. Al llegar, la Mariner 9 observó cómo todo el planeta estaba cubierto por una tormenta de polvo que oscureció el planeta durante un mes. Pero al retirarse la tormenta, sorprendió a todos al mostrar por primera vez los volcanes gigantes y Valles Marineris, el Gran Cañón. Asimismo, mostró restos de redes fluviales (figura 34) en un planeta que se presumía frio y árido. Pero el objetivo más importante alcanzado fue la cartografía fotográfica de la totalidad de la superficie del planeta, lo que proporcionó un material muy valioso para la investigación geológica de Marte. La Mariner 9 estuvo obteniendo y transmitiendo datos durante un año completo.

Figura 34

La fotografía, tomada por el Mariner 9, muestra cráteres de impacto y la red fluvial de Nirgal Vallis.

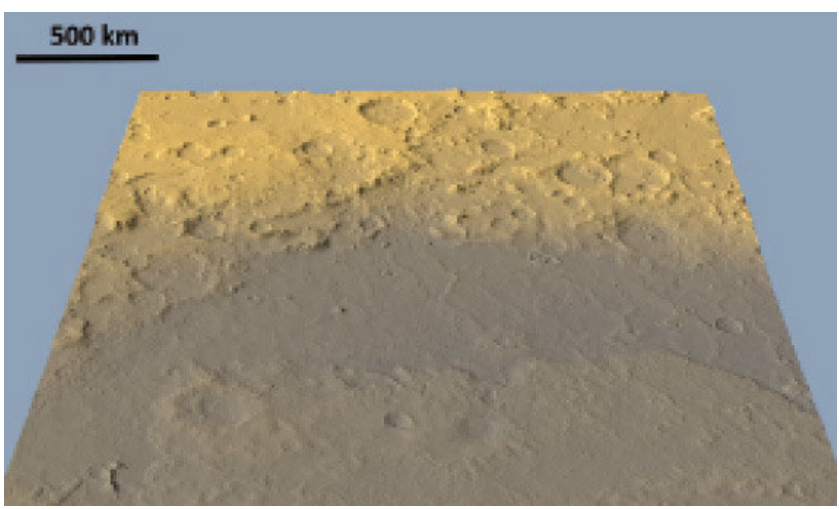
Imagen: NASA/JPL-Caltech.

32. Hellas Planitia: la gran cuenca

de impacto del hemisferio sur

La cuenca de impacto Hellas Planitia (HP en la figura 6, pág. 27) es una zona deprimida de Marte, en las tierras altas del hemisferio sur, formada por el impacto de un gran meteorito (figura 35). Al igual que los cráteres de impacto, se trata de una depresión cerrada pero de dimensiones gigantescas, con un diámetro medio de 2.200 km; forma una cuenca endorreica que, durante épocas pasadas cálidas y húmedas, pudo contener un gran lago. En el hemisferio sur de Marte, el drenaje regional se dirige hacia la cuenca de Hellas o hacia la de Argyre. Sin embargo, a pesar de que hay un relieve considerable alrededor de la cuenca de Hellas, no se han desarrollado grandes redes de drenaje análogas a las cuencas fluviales de los grandes ríos de la Tierra.

Figura 35



Parte del borde norte de la cuenca de impacto Hellas Planitia y relieves residuales dentro de la misma.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

33. Mars Global Surveyor (MGS):

la sonda cartógrafa de Marte

Con el lanzamiento en 1996 de la sonda espacial Mars Global Surveyor (MGS), comenzó una gran misión geológica en la exploración de Marte. De este modo, los objetivos de la MGS fueron: caracterizar el paisaje y los procesos geológicos de Marte; determinar la composición, distribución y propiedades físicas de las rocas, minerales y hielo de la superficie del planeta; determinar la topografía completa del planeta a escala global (MOLA →40); establecer la naturaleza del campo magnético y cartografiar el campo magnético remanente (→41) en la corteza; monitorizar el tiempo meteorológico global y la estructura térmica de la atmósfera, y estudiar las interacciones entre la superficie de Marte y la atmósfera.

Un descubrimiento de la Mars Orbital Camera —un instrumento a bordo de la MGS— fue que el planeta rojo tiene patrones meteorológicos repetitivos y predecibles. Se ha podido observar cómo los patrones de las tormentas de polvo se repiten de un año a otro, con pocos días de diferencia. Las imágenes proporcionadas por la MGS permitieron ver barrancos (gullies) y flujos de detritos (debris flows) que indicaban que podría haber agua líquida en determinados momentos del año. El magnetómetro a bordo de la MGS ha mostrado cómo no hay un campo magnético global, aunque sí ha encontrado campos magnéticos relictos en determinadas zonas de la corteza.

Mediante la observación de Marte a lo largo de varios años marcianos (cada año marciano tiene una duración de dos años terrestres), los datos suministrados por la MGS han permitido examinar la formación de barrancos, las trayectorias de bloques de roca, los cráteres de impacto recién formados y la disminución de hielo seco (CO2 sólido) del casquete glaciar del polo sur del planeta. Asimismo, las aceleraciones de la sonda por cambios en la

gravedad han permitido investigar el interior de Marte. La misión terminó en el año 2006.

Figura 36

Imagen tomada por la Mars Global Surveyor a través de su

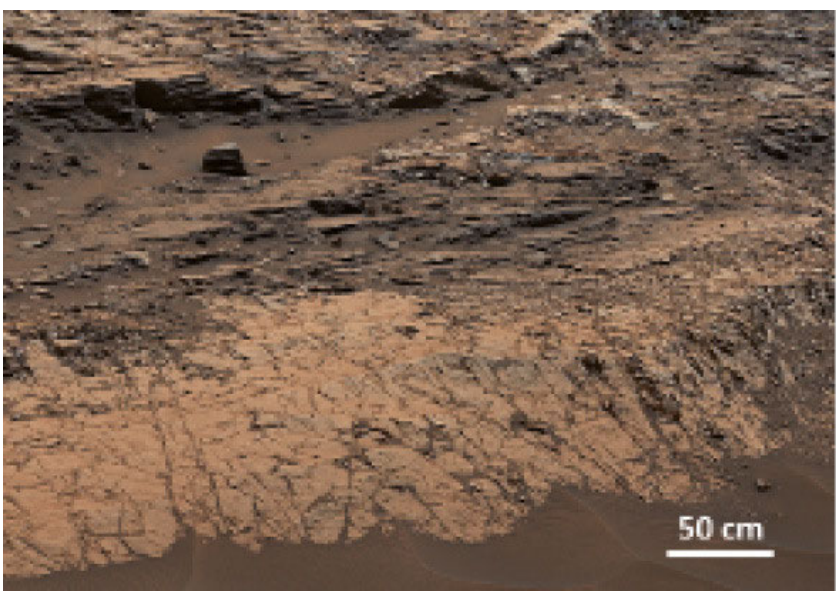
Mars Orbiter Camera.

Muestra un conjunto de fosas producto de la tectónica volcánica en la región de Tharsis. Imagen: NASA/JPL/Malin Space Science Systems.

34. Curiosity: un laboratorio de geología

El Curiosity es el róver con mayor tamaño y mayores posibilidades de investigación de los enviados a Marte hasta la fecha. Forma parte de la misión Mars Science Laboratory de la NASA. Fue lanzado el 26 de noviembre de 2011 y aterrizó en Marte el 5 de agosto de 2012, al pie de una montaña estratificada (figura 37) dentro del enorme cráter Gale y ha tomado muestras de roca, suelo y aire para su análisis.

Figura 37



La fotografía tomada por la Mast Camera (Mastcam) del róver Curiosity, en el área

denominada Marias Pass, muestra un contacto geológico entre

una unidad geológica más antigua de argilita fracturada de color pálido en la parte central y una unidad suprayacente, más oscura, de arenisca con estratificación cruzada. En la parte inferior (a la altura

de la escala), el regolito aparece con ondulaciones por la acción eólica.

Imagen: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

Fue diseñado para responder a una simple pregunta: ¿Tuvo alguna vez Marte las condiciones ambientales adecuadas para albergar vida microbiana? Para ello, fue provisto de los equipos de investigación más completos jamás enviados a Marte. El Curiosity tiene el tamaño de un coche y dispone de un brazo de 2 m de largo para colocar herramientas cerca de las rocas seleccionadas para su estudio. Su gran tamaño le permite llevar importantes instrumentos científicos, cámaras, un láser para vaporizar y estudiar rocas a distancia, así como una pequeña perforadora para tomar muestras de roca pulverizada.

Se dedica a la búsqueda de rocas sedimentarias u otras que puedan tener signos de actividad orgánica. Para ello cuenta con un arsenal de instrumentos científicos. La Mastcam es una cámara que toma imágenes en color y vídeos del terreno de Marte y también se utiliza para estudiar el paisaje de Marte y asistir en las operaciones de desplazamiento del róver y en las de muestreo. La cámara MAHLI proporciona a los científicos imágenes macro de los minerales, texturas y estructuras de las rocas y del regolito de derrubios y polvo. La MARDI es la cámara que grabó vídeos en color durante el descenso del róver hasta posarse sobre la superficie de Marte y proporcionó a los científicos una vista de pájaro del terreno donde se iba a posar el vehículo. APXS es un espectrómetro que mide la abundancia de elementos químicos en las rocas y suelos. ChemCam es un instrumento que usa un láser para vaporizar materiales y analizar posteriomente su composición con un espectrógrafo que lleva a bordo. Otro instrumento, CheMin, identifica y estima la abundancia de varios minerales en el planeta. El grupo de instrumentos SAM busca compuestos con base de carbono que se

pudieran asociar con signos de vida y estudia el modo en que se pudieran generar y destruir en la ecosfera marciana. RAD es un instrumento que identifica y mide la radiación de alta energía (protones, rayos gamma) sobre la superficie, mientras que DAN está diseñado para detectar agua e identificar niveles de agua y hielo en el subsuelo. Por último, REMS es un instrumento meteorológico que elabora informes del tiempo diario y estacional en Marte.

En el año 2019, el Curiosity continuaba operando sobre la superficie de Marte, con tal arsenal de instrumentos científicos que podrá proporcionar una ingente cantidad de datos que suministrarán la mejor información geológica sobre Marte disponible hasta la fecha.

35. El regolito de Marte: el suelo del planeta

La superficie de Marte está recubierta por una capa de material arenoso y polvoriento de espesor variable, producto del poder triturador de miles de millones de impactos de meteoritos a lo largo de los millones de años de historia geológica en los que el planeta no ha contado con una atmósfera densa y protectora frente a los impactos provenientes del espacio exterior. Además, hay que considerar la contribución que ha tenido la acción abrasiva del viento, que transporta polvo en suspensión, así como los efectos de roturas por los ciclos de hielo-deshielo (crioclastia o gelifracción) en las zonas glaciares y periglaciares.

Figura 38

Regolito del suelo de Marte en el lugar donde se posó el InSight (→30). La roca del centro

(de unos 5 cm) fue desplazada 1 m al posarse el aterrizador (puede verse el surco

de su trayectoria) y ha sido llamada informalmente por la NASA

la Rolling Stones Rock, en honor al famoso grupo musical.

Imagen: NASA/JPL-Caltech.

La figura 38 muestra un típico regolito en la superficie marciana cerca de donde aterrizó la sonda InSight. En otras zonas (figura 39), el regolito convive con bloques de rocas de mayor tamaño, que en el caso de la figura se interpretan como la llanura de inundación de las gigantescas avenidas (→9) que ocurrieron en Marte en el pasado. En otras zonas se encuentran igualmente, conviviendo con el suelo, rocas que proceden del material arrojado por el impacto de meteoritos, productos de erupciones volcánicas o de los procesos glaciares y periglaciares. El regolito de Marte es el suelo del planeta. Sin embargo, el término "suelo" en Marte no conlleva ninguna connotación que implique la existencia de materia orgánica, como es el caso habitual en la Tierra. Todos los experimentos realizados en el suelo de Marte por los aterrizadores o róveres que se han posado sobre su superficie hasta la fecha han dado resultados negativos en cuanto a la presencia de materia orgánica. Por consiguiente, la definición de suelo en Marte es meramente funcional y se considera como tal a todos los fragmentos de roca menores a 10 cm. Es este regolito el que le da a Marte el epíteto de planeta rojo, ya que el suelo marciano es rico en óxidos de hierro, dando el típico color rojizo de los materiales oxidados.

Todo comenzó hace unos 4.500 millones de años, durante la formación del sistema solar. El hierro estaba presente en la nube de gas y polvo que, por acreción, debido a los choques y al efecto gravitacional, formó el sol y los planetas. Mientras que en la Tierra el hierro se hundió, por ser más denso, para formar el núcleo cuando el planeta estaba fundido en su juventud; en Marte, debido a su menor tamaño y gravedad, se tuvo menos diferenciación gravitacional, de modo que, aunque también hay hierro en el

núcleo, quedó mucho en el manto y en la corteza. Ahora bien, para que el hierro se oxide, hace falta oxígeno para formar un óxido. ¿De dónde se obtuvo dicho oxígeno? Los científicos están divididos entre los que piensan que ese oxígeno vino del agua que hubo en Marte (→5) muy en el pasado, cuando hubo un océano y el ciclo hidrológico se encargaba de ir transportando agua reiteradamente sobre la superficie de la parte emergida, y aquellos que piensan que el oxígeno podría venir de la ruptura, por parte de la luz solar, de moléculas de dióxido de carbono, lo que facilitó la presencia de agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno y el ozono. La forma mineral más abundante de estos óxidos de hierro es la hematites y ya se ha probado, usando diferentes instrumentos, la existencia abundante de este mineral en la superficie de Marte.

Figura 39

Paisaje marciano con bloques de roca y regolito tomada por el róver Curiosity.

La imagen muestra la llanura de inundación de una de las gigantescas avenidas

que Marte tuvo en su pasado geológico.

Imagen: NASA/JPL-Caltech.

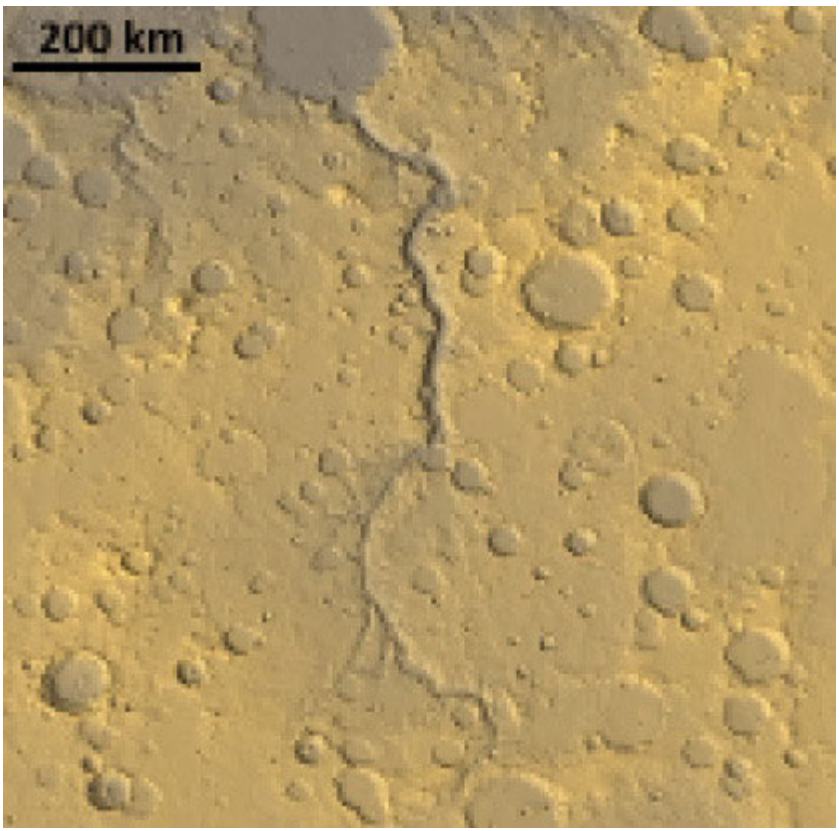
36. Ríos en Marte: la universalidad de los meandros

Diferentes canales de drenaje y valles fluviales se han ido descubriendo en Marte desde la misión Mariner 9 (→31). Estos levantaron muchas expectativas, ya que indicaban que se habrían producido por la acción erosiva de la escorrentía del agua de lluvia, lo que implicaba que, en un tiempo lejano, Marte debió de poseer una atmósfera más densa y un clima más cálido y húmedo que en la actualidad. Esta era una deducción lógica, pues los valles fluviales de Marte parecían semejantes a los de la Tierra. Sin embargo, cuando se dispuso de datos lo suficientemente precisos de la topografía de Marte —proporcionados por el Mars Orbiter Laser Altimeter (→40) a bordo de la Mars Global Surveyor (→33) —, que posibilitaron el análisis morfométrico (cuantitativo) de las cuencas fluviales marcianas en cuanto a estilos e intensidad de erosión, se pudo deducir que las características morfológicas de las cuencas marcianas no eran consistentes con una erosión prolongada por escorrentía superficial de la lluvia que, en la Tierra, produce arroyadas y la incisión de canales de drenaje.

Sobre la base de la forma de los perfiles longitudinales de los cauces, los frecuentes puntos de ruptura, los valles colgados y los bajos exponentes de concavidad de la cuenca, se ha concluido, por analogía con la superficie terrestre, que en la incisión de los valles fluviales de Marte ha sido determinante la acción de la socavación y el rezume del agua subterránea (groundwater sapping), esto es, la retirada y transporte de material producido por el agua subterránea al acceder a la superficie del terreno. La anchura de un valle fluvial por escorrentía superficial se va incrementando aguas abajo, mientras que se mantiene más o menos constante en el caso del sapping. Asimismo, la cabecera de los valles es de forma biselada en el caso de erosión de arroyada, mientras que tiene forma de anfiteatro en el caso de sapping. Por otra parte, las redes dendríticas son también indicativas de escorrentía superficial de lluvia. De este

modo se concluye que la escorrentía superficial ha jugado un papel muy secundario en la formación del paisaje marciano. No obstante, si no hubiera existido lluvia, se tiene el problema de explicar cómo se ha producido la recarga de los grandes acuíferos que son necesarios para producir los enormes rezumes que formaron los valles fluviales marcianos. Por otra parte, los meandros se observan en los canales de Marte (figuras 40 y 41), al igual que en todos los ríos de la Tierra, pareciendo ser una característica universal del flujo de un fluido canalizado en la superficie de un planeta.

Figura 40



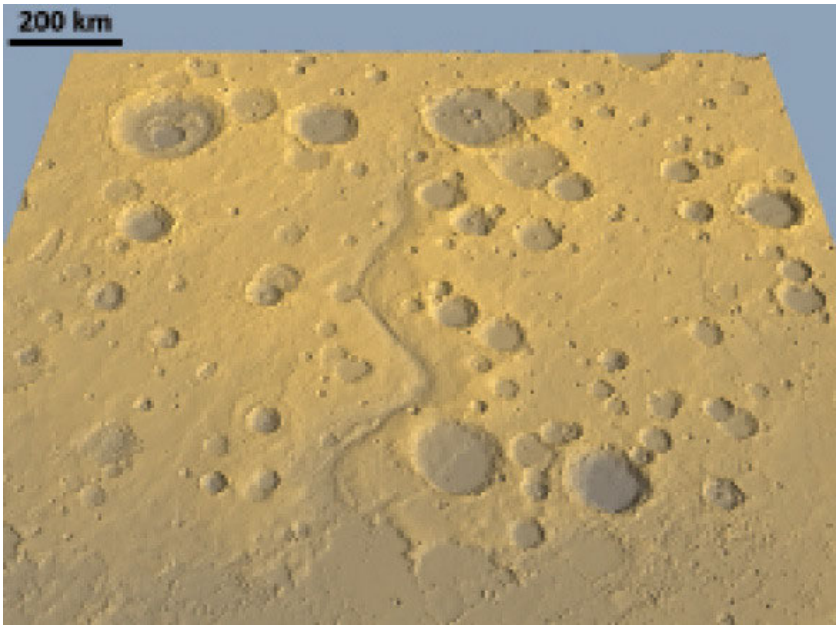
Ma'adim Vallis, donde se observa un canal de drenaje

meandriforme

que termina en un cráter de impacto.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

Figura 41



Canal meandriforme en Arabia Terra.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

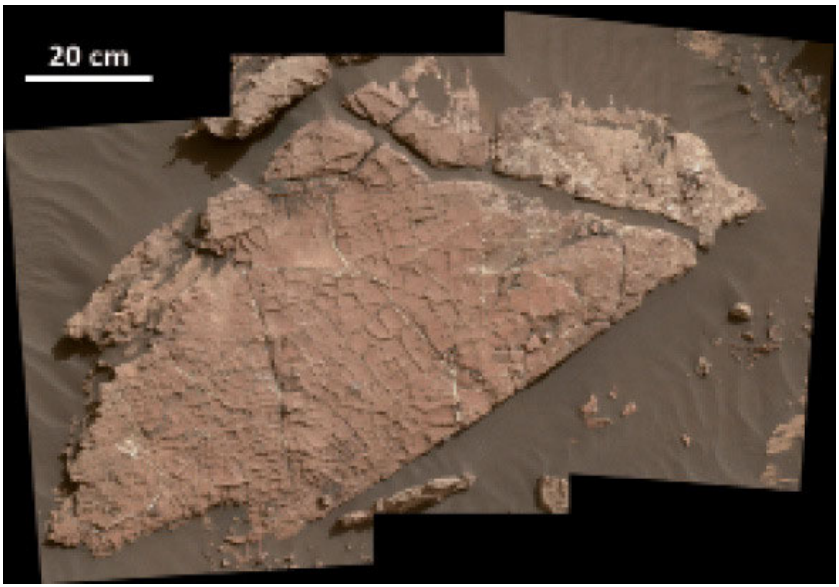
37. ¿Dónde buscar fósiles en Marte?

Aunque desde hace 3.000 millones de años hasta la actualidad, Marte ha sido un planeta frío y seco, se sabe que en el pasado remoto el planeta tuvo periodos cálidos y húmedos que pudieron albergar vida. Esos organismos vivos pudieron dejar rastros de su actividad (trazas fósiles) o moldes de los mismos en las rocas del registro geológico del planeta. Por lo tanto, se pueden buscar fósiles. ¿En qué tipo de rocas de Marte se podrían encontrar dichos fósiles? Para responder a esta pregunta se está llevando a cabo una intensa investigación por parte de las agencias espaciales americana (NASA) y europea (ESA), ya que condicionará tanto los lugares de Marte a investigar por futuras misiones espaciales como las zonas en las que futuros róveres equipados deberán perforar, decidir qué muestras extraer y analizar o, incluso, determinar qué muestras enviar a la Tierra para un análisis exhaustivo.

En Marte se han encontrado evidencias de un antiguo océano, redes fluviales, paleolagos, deltas y otros paleoambientes que pudieron ser habitables por primitivas formas de vida. Por otra parte, por los procesos de fosilización en la Tierra se sabe que el sedimento puede cubrir el cuerpo de animales muertos y, en general, las partes duras (caparazones o esqueletos) pueden quedar preservadas, así como pueden preservarse sus moldes, o, incluso, los minerales pueden replicar la morfología de los organismos y ocupar los huecos que quedan tras la descomposición de dichos organismos. Por consiguiente, ¿qué rocas y minerales de Marte son potencialmente fosilíferos? Los investigadores en astrogeología, considerando la distribución de litofacies y minerales de Marte, la habitabilidad de los paleoambientes que dichas litofacies y minerales representan, y teniendo en cuenta la potencialidad de estos para preservar formas o actividades de vida de acuerdo al conocimiento de similares paleoambientes en la Tierra, han concluido que los rocas sedimentarias lacustres (→58) de grano muy fino (mudstones) ricas en sílice deberían ser la prioridad para la búsqueda optimizada de fósiles en Marte. En segundo lugar, ofreciendo condiciones mucho

más inciertas y que requieren de mucha más investigación para su confirmación, estarían los precipitados de aguas termales, los poros y fracturas mineralizadas en el subsuelo y las rocas evaporíticas.

Figura 42



La imagen muestra la existencia de grietas de retracción formadas cuando una capa de lodo sedimentario se secaba, hace 3.000 millones de años, en un ambiente lacustre. La figura

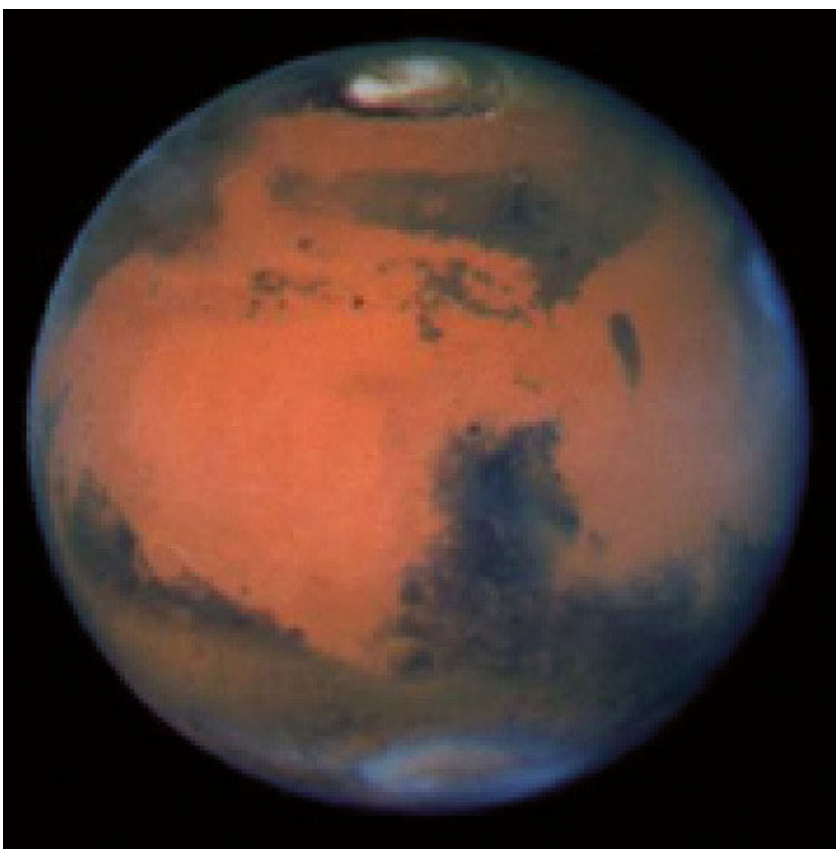
se ha generado a partir de un mosaico de imágenes tomadas por la cámara Mars Hand Lens Imager (MAHLI) del brazo robótico del róver Curiosity de la NASA. Esta roca, que ha recibido

el nombre de Old Soaker, podría ser una buena candidata para la búsqueda de posibles fósiles. Imagen: NASA/JPL-Caltech/ MSSS.

38. Marte, el planeta rojo

Marte (figura 43) se conoce como el planeta rojo por el color que le confiere la abundancia de óxido de hierro en su superficie. Junto con Mercurio, Venus y la Tierra, es uno de los cuatro planetas rocosos del sistema solar.

Figura 43



Esta imagen, que muestra la fotografía más nítida y detallada que se ha tomado de Marte

desde la Tierra, fue realizada por el telescopio espacial Hubble de la NASA. El polo norte marciano está en la parte superior, cerca del centro del casquete polar, de color blanco,

que se observa claramente en la figura. En la fotografía también se pueden observar

las áreas claras y oscuras de la superficie de Marte, que han sido conocidas

por los astrónomos durante más de un siglo.

Imagen: NASA/JPL.

La distancia mínima de Marte a la Tierra es de 54 millones de km y la máxima de 400, de modo que la distancia media es de unos 225 millones de km. Esa puede compararse con los 400.000 km de distancia media entre la Tierra y la Luna. El radio de Marte (3.400 km) es aproximadamente la mitad del radio de la Tierra (6.400 km), por lo que su volumen es una séptima parte del de esta. Por otra parte, mientras que la densidad media de la Tierra es de 5,5 g/cm^3, la densidad media de Marte es de 3,7 g/cm^3.

Marte tiene dos satélites o lunas, Fobos y Deimos, de 11 y 6 km de diámetro, y densidades de 1,9 y 1,7 g/cm^3, respectivamente. Algunas teorías apuntan a que ambos satélites son trozos desgajados de Marte por colisiones con meteoritos, mientras que otras teorías sugieren que son dos asteroides del Gran Cinturón de Asteroides atrapados por Marte.

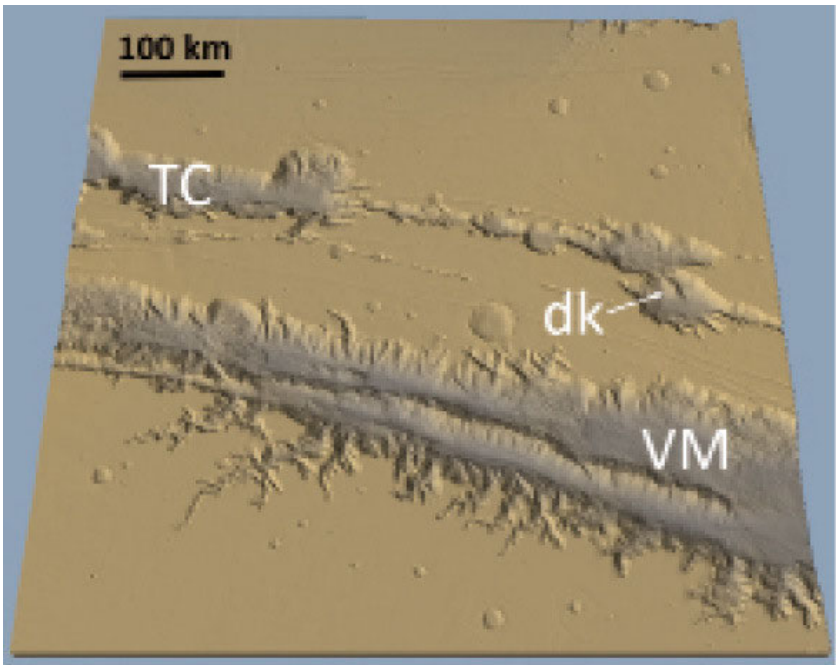
39. ¿Karst en Marte?

Existen diferentes hipótesis sobre la existencia en Marte de posibles fenómenos kársticos, tanto en rocas carbonatadas como evaporíticas, según las opiniones mantenidas por diferentes investigadores. De este modo, se ha sugerido que el sistema Hephaestus Fossae (→60) puede indicar la existencia de un endokarst (sistema de cuevas) formado por disolución de depósitos de carbonatos que estarían en profundidad. Esta es una inferencia indirecta de la presencia de un karst carbonatado, ya que los únicos depósitos de este tipo que se han identificado en las llanuras del norte de Marte fueron exhumados por un cráter de impacto desde una profundidad estimada de unos 6 km. Ambas evidencias sugieren que pueden existir depósitos carbonatados en profundidad, susceptibles de karstificarse. Por otra parte, en la superficie se han encontrado evidencias geomorfológicas similares a las de un karst evaporítico en la Tierra. De este modo, en Titonium Chasma (figuras 44 y 45), una zona de la parte occidental de Valles Marineris, se encuentra, en su parte este, un domo de kieserita, un mineral evaporítico de sulfato de magnesio que es altamente soluble. En este domo se han encontrado morfologías típicas de un karst evaporítico (figura 45).

Utilizando imágenes de alta resolución se han identificado morfologías de procesos de disolución que han actuado de un modo selectivo, demostrándose la variabilidad geológica del domo y la presencia pasada de agua que hubo de intervenir en dichos procesos de disolución. En particular, se han encontrado regueros de disolución (lapiaz) y unas geometrías parecidas a las dolinas de disolución y de colapso (depresiones cerradas por disolución de la roca o por hundimiento del techo de una caverna, respectivamente). También se han encontrado cuevas de descarga en el flanco sur del domo. Recordemos que para que se forme un karst ha de existir un sistema de drenaje subterráneo del agua. Este karst evaporítico en la superficie de Marte implicaría un ambiente árido, con una disponibilidad de agua durante el tiempo suficiente para la

formación de dicho karst, pero no tan prolongada como para que se hubiese disuelto y no hubiera podido preservarse. El agua podría haber sido suministrada por la fusión de hielo.

Figura 44



La figura muestra la localización del domo de kieserita (dk) dentro de Titonium Chasma (TC)

en el sistema del Gran Cañón de Marte, Valles Marineris (VM).

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

Figura 45

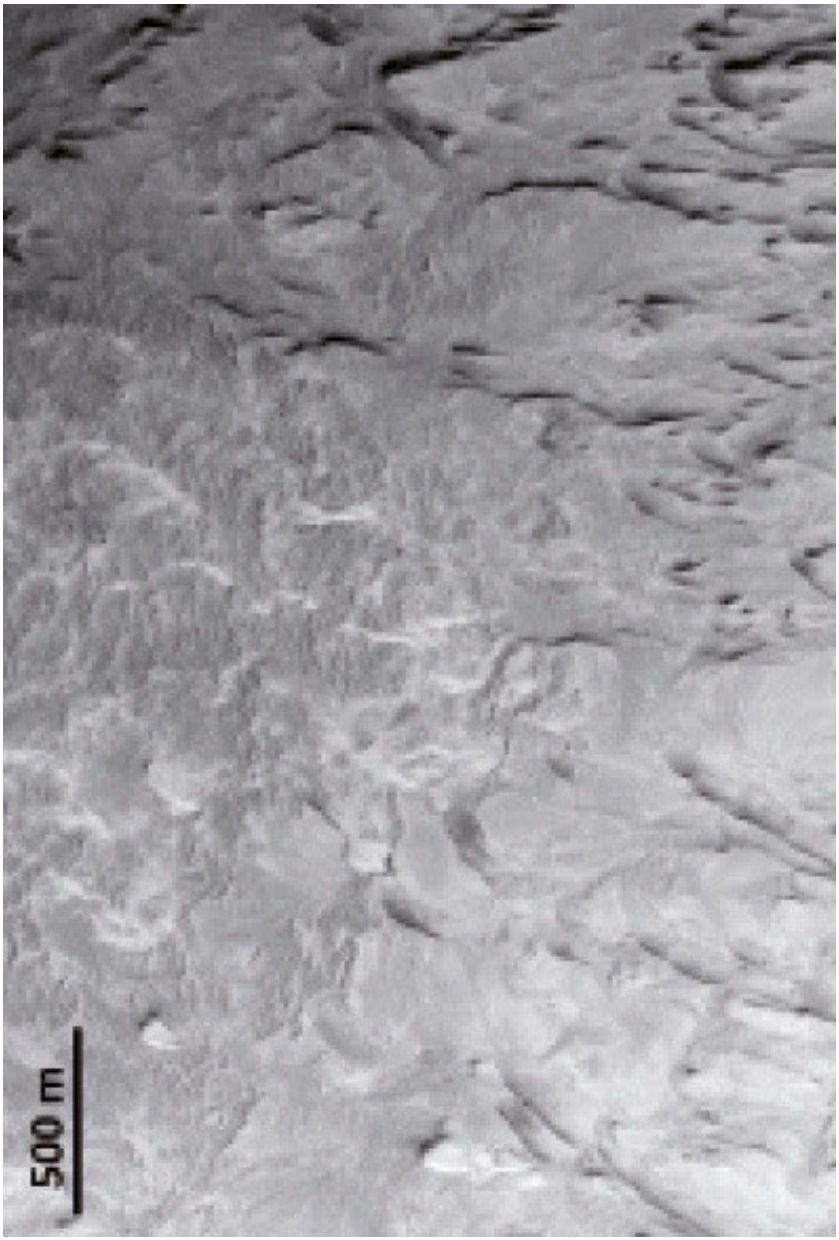


Imagen de la cámara HiRISE de alta resolución que muestra un detalle del domo

con un presunto karst evaporítico en Titonium Chasma, dentro

del sistema de Valles Marineris. Imagen: NASA/JPL/Univeristy of Arizona.

40. MOLA: la topografía de Marte

a escala global

A muchos lectores les resultarán familiares los mapas topográficos en papel con curvas de nivel que hemos utilizado frecuentemente en las excursiones a la montaña. Sin embargo, los modernos mapas topográficos son mapas digitales, una matriz de celdas con números donde cada número representa la altitud del terreno. Estos nuevos mapas son los modelos digitales de elevaciones (MDE). Las celdas de la matriz suelen ser cuadradas y el lado de la celda, en unidades del terreno, es lo que se conoce como resolución del MDE. Por ejemplo, en España, el Instituto Geográfico Nacional ofrece en su página web el MDE de todo el territorio español a una resolución espacial de 5 m. Del mismo modo, en la página web de la NASA se ofrece un MDE para toda la superficie de Marte.

Estos son los datos obtenidos por el instrumento Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) a bordo de la sonda espacial Mars Global Surveyor (MGS) de la NASA. Se trata de un altímetro láser a bordo de la sonda MGS que orbita Marte y que envía un impulso láser a la superficie del planeta y el instrumento registra el tiempo que tarda en volver el impulso reflejado sobre esta superficie. De este modo, ha sido posible calcular el MDE de Marte (figura 46), donde los colores están relacionados con la altitud del terreno, tal y como muestra la escala. En la Tierra, la altitud del terreno se calcula con respecto al nivel medio del mar. Como en Marte no hay océanos, no existe un "nivel del mar" de referencia y ha de utilizarse otro diferente. Hasta el año 2001 se utilizó como nivel de referencia una presión atmosférica constante e igual a 6,105 mbar, que es la presión a la que ocurre el punto triple del agua —aproximadamente un 0,6 por ciento de la presión en la Tierra a nivel del mar—. A partir del año 2001, con los datos MOLA, la altura cero se definió como una superficie equipotencial cuyo valor medio es igual al radio medio de Marte. Los MDE a partir de los datos MOLA tienen una resolución espacial de unos 460 m. Es decir, con estos modelos

no se pueden estudiar estructuras geológicas con tamaños menores a dicho valor. La figura 46 muestra la topografía de Marte entre las latitudes 70o N y 70o S. También se dispone de los datos MOLA para el resto de latitudes no representadas en esta figura, es decir, para las regiones polares.

Muchas imágenes de este libro han sido obtenidas mediante un programa de visualización de los datos MOLA, tal y como se indica en los créditos de dichas imágenes. La resolución de estos datos revela cambios en la topografía que no se habían observado con otras imágenes, lo que ha permitido a los científicos efectuar nuevos avances en el conocimiento de la geología de Marte. Localmente, la resolución de los datos MOLA se mejora a partir de MDE construidos sobre la base de pares estereoscópicos de imágenes obtenidas por diferentes cámaras de alta resolución como la HiRISE (→44).

Figura 46

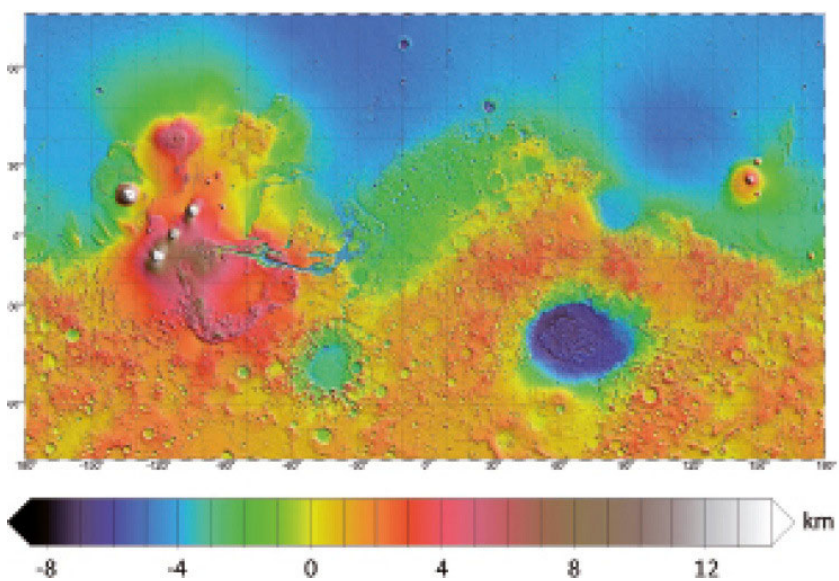


Imagen de la topografía de Marte

a partir de los datos del altímetro MOLA. Es igual a la figura 6 (pág. 27), pero se muestra aquí libre de los nombres geográficos para que puedan observarse mejor los rasgos

geológicos que quedan resaltados

por la topografía marciana.

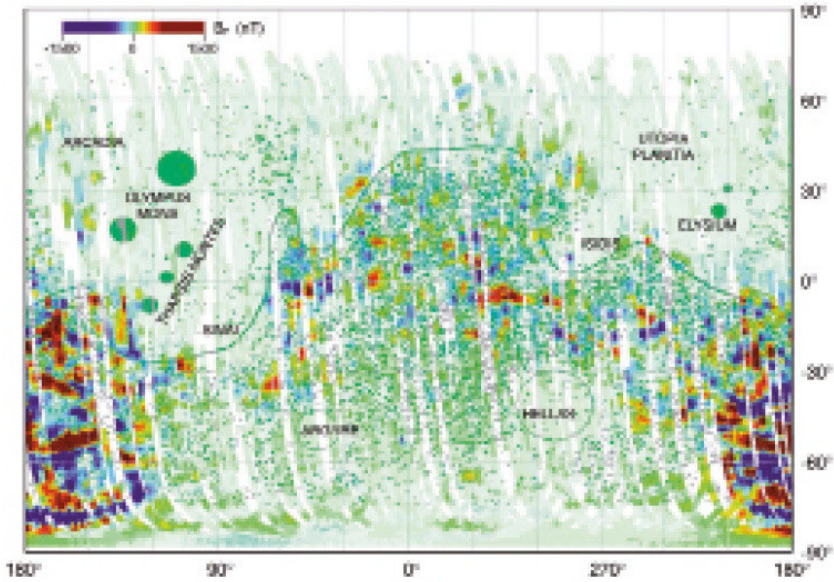
Imagen: NASA/JPLUniversity of Arizona.

41. El campo magnético marciano

La estructura interior de Marte es similar a la de los otros planetas rocosos del sistema solar, con un núcleo, un manto y una corteza. Después de todo, estos planetas vienen de la acreción del mismo polvo estelar y de meteoritos que se fueron agregando a los mismos hace unos 4.500 millones de años. Sin embargo, por el menor tamaño de Marte con respecto a la Tierra, lo que implica una ratio mayor entre la superficie y el volumen del planeta, el núcleo de Marte se enfrió más rápidamente y el planeta no presenta, en la actualidad, un campo magnético como el terrestre. Esto se debe a que el campo magnético de un planeta se origina por el efecto dinamo de la rotación del hierro fundido de su núcleo externo.

En la actualidad, Marte tiene un campo magnético residual que es 10.000 veces menos intenso que el campo magnético de la Tierra. No obstante, debió de haber existido un campo magnético intenso en el pasado, pues se ha detectado un campo magnético remanente en las rocas de la corteza marciana (figura 47). La ausencia de magnetización en los grandes cráteres de impacto permite establecer que la dinamo de Marte cesó hace más de 3.500 millones de años. La falta de un campo magnético global a lo largo de millones de años ha contribuido a la desaparición de la atmósfera de Marte por la erosión de la misma ejercida por el viento solar y ha contribuido también a la pérdida de agua por parte del planeta.

Figura 47



Mapa global de anomalías magnéticas de Marte. La imagen la ha elaborado la NASA a partir de los datos que fueron tomados por el magnetómetro a bordo de la sonda Mars Global Surveyor. Se muestra un campo magnético radial a escala global, donde se han señalado los grandes cráteres y volcanes. La línea marca

la dicotomía hemisférica.

Imagen: NASA/JPL/GSFC.

42. Periodos geológicos

Mediante los métodos de datación que utilizan la densidad de los cráteres de impacto superiores a un determinado diámetro (→15) se han diferenciado cuatro grandes eras en las que puede dividirse la historia geológica de Marte. De más antigua a más moderna, son: Prenoeica, Noeica, Hespérica y Amazónica. Dichos nombres derivan de diversas zonas de Marte con rasgos distintivos a escala global. La era Prenoeica corresponde al intervalo temporal que va desde la acreción y diferenciación del planeta, hace unos 4.500 millones de años (al igual que la Tierra), hasta la formación de la cuenca de impacto de Hellas (→32), hace unos 4.100 millones de años. El registro geológico de este intervalo se ha borrado por los cráteres de impacto posteriores, ya que el Gran Bombardeo Meteorítico tuvo lugar entre hace 4.100 y 3.800 millones de años. Se estima que la dicotomía hemisférica de Marte (→6) se formó en este periodo, como resultado del impacto de un cuerpo celeste de gran tamaño. Se ha inferido que en aquel periodo Marte tenía probablemente agua y una atmósfera densa.

A continuación, tenemos la era Noeica (hace 4.100-3.700 millones de años). En este periodo se originan las superficies más antiguas que se conservan en Marte y que se caracterizan por la existencia de grandes cráteres de impacto. Fue entonces cuando se formaron el domo volcánico de Tharsis (→26), las redes fluviales (→36) y grandes lagos o, posiblemente, un océano (→5); es decir, todo apunta a que hubo abundancia de agua, aunque la atmósfera comenzaba a desaparecer.

Después continúa la era Hespérica (hace 3.700-3.000 millones de años), que estuvo marcada por la formación de grandes llanuras de lava. Se produjeron gigantescas inundaciones (→9) por la súbita salida de agua subterránea, que dejaron un rastro erosivo en el terreno, y se pudieron formar lagos o mares efímeros en las tierras bajas del norte del planeta.

Por último, la era Amazónica (desde hace 3.000 millones de años hasta la actualidad) está representada por terrenos que tienen pocos impactos de meteoritos. Durante este periodo continuaron los flujos de lava, la actividad glacial y periglacial, y la presencia de flujos de agua líquida, aunque a menor escala. Marte presenta un ambiente seco y frío, con una atmósfera muy fina y donde la mayor parte del agua se ha evaporado o congelado.

43. Estructura interna del planeta

La estructura interna de Marte es parecida a la de la Tierra, con un núcleo metálico, un manto y una corteza rocosa. Como en la Tierra, nuestro conocimiento de su interior se basa en las observaciones que realizamos en su superficie (tectónica, geología estructural, composición química y mineralógica de las rocas, etc.), el campo gravitatorio, los datos sismológicos, el gradiente geotérmico, los datos de laboratorio y los datos de modelos de la estructura interna del planeta. Sin embargo, para Marte esta información es mucho más limitada que para la Tierra. Por ejemplo, la información sismológica sobre Marte es prácticamente nula, por lo que nuestro conocimiento de la estructura interna marciana es mucho más deficiente. Por ello, los científicos se han de basar mucho más en modelos más o menos teóricos de la estructura interna del planeta.

En un primer paso, estos modelos proponen diferentes propiedades para el núcleo, el manto y la corteza, como pueden ser su espesor y composición química y mineralógica, así como la distribución de las variables termodinámicas de densidad, presión y temperatura. Y, en un segundo paso, se contrasta dicho modelo con toda la información experimental disponible. Sin embargo, para Marte, debido a que esa información disponible es aún muy limitada, son varios los modelos que son consistentes para explicar la misma información experimental, aunque sean muy diferentes. Por lo tanto, desconocemos con precisión el radio del núcleo, su composición y su estado físico (sólido o líquido). Desconocemos también la composición del manto y si está inmóvil o sujeto a corrientes de convección, como ocurre en la Tierra. No sabemos si hay discontinuidades en el manto, ni si la corteza está formada por una única pieza, o por varias placas tectónicas.

Toda esta información de la estructura actual del planeta enlaza con el origen y evolución del mismo a lo largo de miles de millones de años. Sabemos que Marte es un planeta más pequeño que la Tierra, por lo que se enfrió más rápido, de modo que se desarrolló una

listosfera más gruesa, mientras que el interior más profundo permaneció caliente. La presencia de un campo magnético global es una buena indicación de la existencia de un núcleo de metal fundido. Sin embargo, Marte carece de dicho campo magnético global.

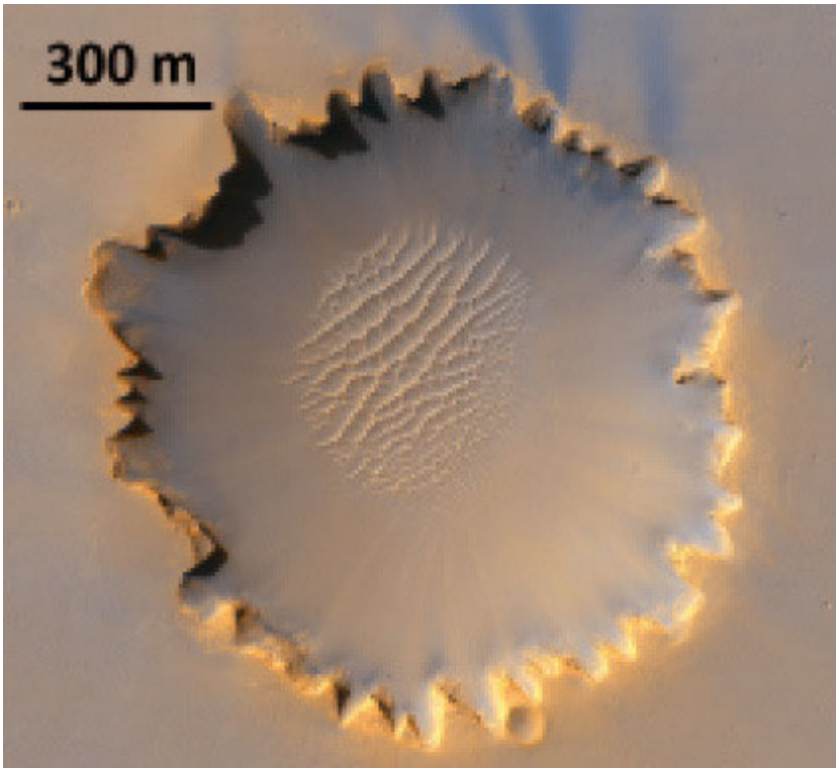
La reciente misión InSight (→30) llegó a Marte en 2018 para ayudar a entender el interior del planeta, por lo que es de esperar que en los próximos años nuestro conocimiento de su interior aumente de modo considerable y nos depare algunas sorpresas interesantes.

44. HiRISE: imágenes de alta resolución

de la superficie de Marte

La High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) es una cámara a bordo de la sonda espacial Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) que proporciona imágenes de la superficie de Marte con una resolución espacial de 30 cm, esto es, cada imagen está formada por píxeles y cada pixel representa un cuadrado de la superficie del terreno de 30 cm de lado. Por consiguiente, es posible ver aquellos detalles de la geología que tengan un tamaño mayor a dicha resolución espacial.

Figura 48



El cráter Victoria, fotografiado por la cámara de alta resolución HiRISE. Se trata

de un cráter de impacto situado cerca del ecuador de Marte. Tiene un característico

borde ondulado, producto de la erosión y de los deslizamientos de los bordes.

En el interior de sus paredes afloran rocas sedimentarias laminadas, tal y como

descubrió el róver Opportunity (→49). El fondo del cráter está ocupado

por un espectacular campo de dunas.

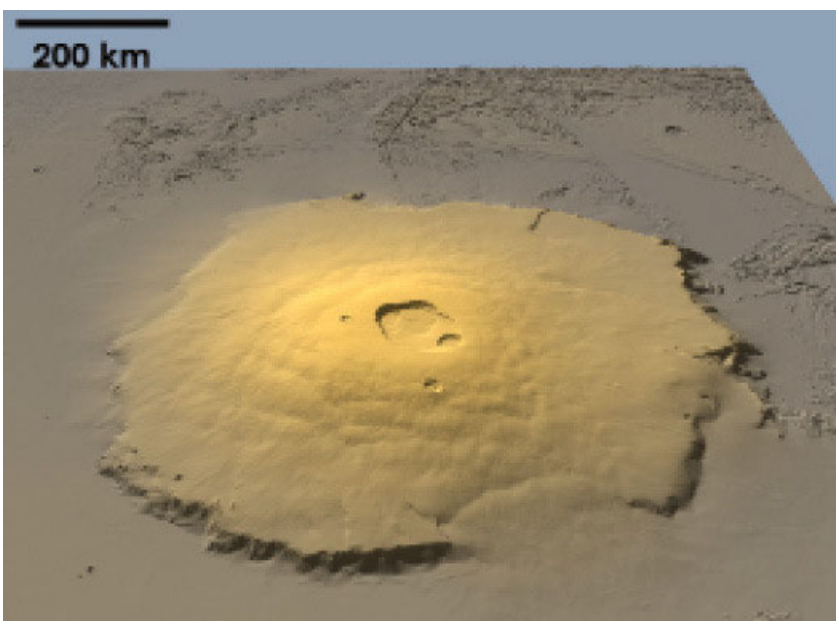
Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

La cámara HiRISE ha incrementado en un orden de magnitud la resolución que proporciona la cámara Mars Observer Camera (MOC) a bordo del Mars Global Surveyor (MGS). Por otra parte, los róveres que circulan por la superficie de Marte proporcionan imágenes de detalle con mucha mejor resolución, pero lógicamente solo cubren las localizaciones visitadas por el róver, mientras que las cámaras a bordo de las sondas que orbitan Marte tienen acceso a toda la superficie del planeta.

45. Olympus Mons: el mayor volcán del sistema solar

Con sus 23 km de altura y 600 km de anchura, es considerado el mayor volcán conocido del sistema solar. Se trata de un volcán en escudo situado al noroeste del domo volcánico de Tharsis (figura 6, pág. 27). En la cumbre del volcán, se encuentran una serie de calderas superpuestas que forman una depresión de unos 60 km de diámetro y 3 km de profundidad. En los flancos, el volcán tiene acantilados de hasta 8 km de altura, producto del deslizamiento de sus laderas. En algunas partes, nuevas coladas de lava han cubierto el acantilado (figura 49).

Figura 49



Vista en perspectiva de Olympus Mons, el mayor volcán del sistema solar. En la cumbre

se pueden observar una serie de calderas superpuestas y en los flancos se ven dos cráteres de impacto. También se observan las terrazas formadas por las sucesivas coladas de lava,

así como los escarpados flancos por el deslizamiento de las laderas del volcán.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

El enorme tamaño de este y otros volcanes de Marte se atribuye a la ausencia de una tectónica de placas, con lo que un punto caliente (hot spot) puede estar emitiendo lava en el mismo sitio durante un largo periodo de tiempo, de modo que se pueden originar estructuras volcánicas de proporciones gigantescas. Se formó como resultado de muchos flujos de lava basáltica muy fluida, lo que originó pendientes muy suaves en los flancos, si exceptuamos los acantilados de los bordes. Aunque el volcán se formó durante la era Hespérica, utilizando el método de datación de la densidad de cráteres de impacto (→15) a partir de imágenes de alta resolución, se ha podido estimar que alguna de las coladas tiene una edad de unos 100 millones de años, lo que resulta muy moderno para la historia geológica de Marte (→4).

El Olympus Mons tiene una aureola de depósitos que proceden del deslizamiento de ladera de sus bordes y de la acción de esfuerzos de extensión (→22), propios de los grandes edificios volcánicos que implican un peso enorme sobre los materiales subyacentes, en ocasiones poco consolidados, que no pueden soportar dicha carga y responden mediante una extensión lateral. Para que se produjesen estos deslizamientos en flancos de pendiente muy suaves se necesitaría de un mecanismo que redujera la resistencia y cohesión interna de los materiales, como podría ser la fusión de hielo en el subsuelo o martemotos relacionados con la actividad volcánica. El Mauna Loa en las islas Hawái es considerado un análogo terrestre del Olympus Mons.

46. La atmósfera de Marte

Marte está rodeado por una delgada atmósfera que en un 95 por ciento está compuesta de dióxido de carbono y que proporciona una presión en superficie unas 160 veces menor que la de la Tierra, ya que la atmósfera de Marte tiene una masa 200 veces menor a la terrestre. El planeta tuvo, en el pasado geológico, una atmósfera mucho más densa que la actual, pero se perdió por la acción del viento solar. La atmósfera actual genera una presión media en la superficie de 0,006 atmósferas, siendo 1 atmósfera la presión media en la superficie de la Tierra al nivel del mar. No obstante, en la superficie de Marte hay fuertes vientos que alcanzan los 100 km/h y que generan tormentas de polvo que pueden cubrir grandes extensiones del planeta. La fina atmósfera y la ausencia de un campo magnético inhiben al planeta de tener protección contra la radiación y el viento solar. Las temperaturas superficiales oscilan entre -90oC y 20oC, con una temperatura media de -60oC. La baja temperatura, la baja presión atmosférica y la intensa radiación solar hacen de Marte un lugar inhóspito para vivir.

47. Las sondas espaciales Viking:

primeras imágenes desde la superficie

del planeta

El proyecto Viking de la NASA marcó un hito en la investigación espacial al ser la primera misión estadounidense (y mundial) que permitió aterrizar un vehículo espacial en Marte y tomar fotografías de su superficie. El proyecto consistía en dos parejas de orbitadores-aterrizadores: el Viking 1 y el Viking 2. El primero aterrizó en Chryse Planitia y el segundo en Utopía Planitia (figura 6, pág. 27). Las sondas se lanzaron desde Cabo Cañaveral (Florida) en 1975 y los aterrizadores se posaron sobre Marte en 1976. Estos, además de tomar fotografías de la superficie de Marte y otro tipo de datos científicos, realizaron experimentos biológicos en busca de vida en el suelo de Marte, que arrojaron resultados negativos.

Aunque las misiones se planearon para que durasen 90 días después de posarse sobre Marte, cada orbitador y aterrizador excedieron, con mucho, dichas expectativas. Los aterrizadores no estaban alimentados por energía solar, como uno podría suponer, sino por energía nuclear, para solventar el problema de las variaciones en la luz solar disponible. La última señal enviada a la Tierra por la misión tuvo lugar el 11 de noviembre de 1982 por parte del Viking 1. Los resultados de la misión dieron una imagen completa de Marte. Las fotografías de los orbitadores mostraron las características geológicas principales de la superficie del planeta, así como la dicotomía hemisférica. El suelo encontrado en los lugares de aterrizaje se puede definir como una arcilla rica en hierro. También se observaron tormentas estacionales de polvo, cambios de presión atmosférica y transporte de gases atmosféricos entre los casquetes polares.

Figura 50

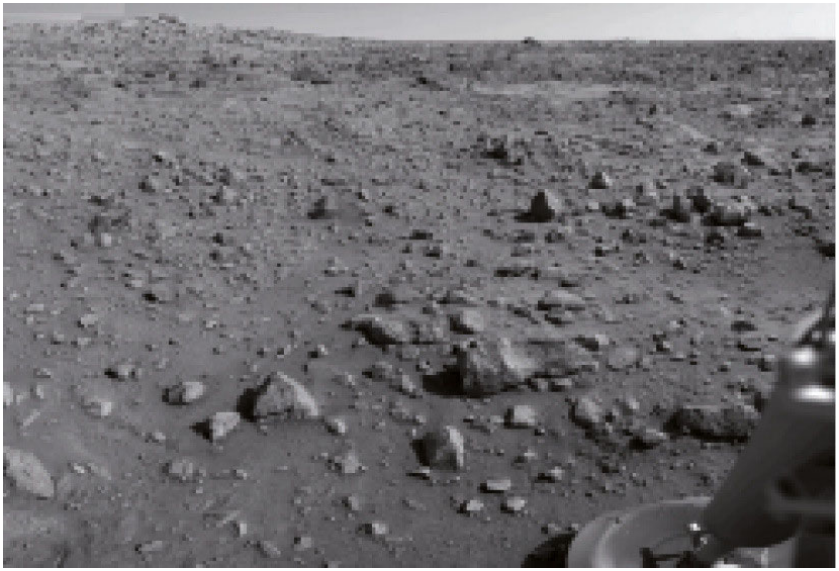


Imagen del atardecer

en Chryse Planitia tomada por la Viking Lander Camera System, localizada en

el aterrizador

(una parte se puede ver en mariatorre

la esquina

inferior derecha)

del Viking 1.

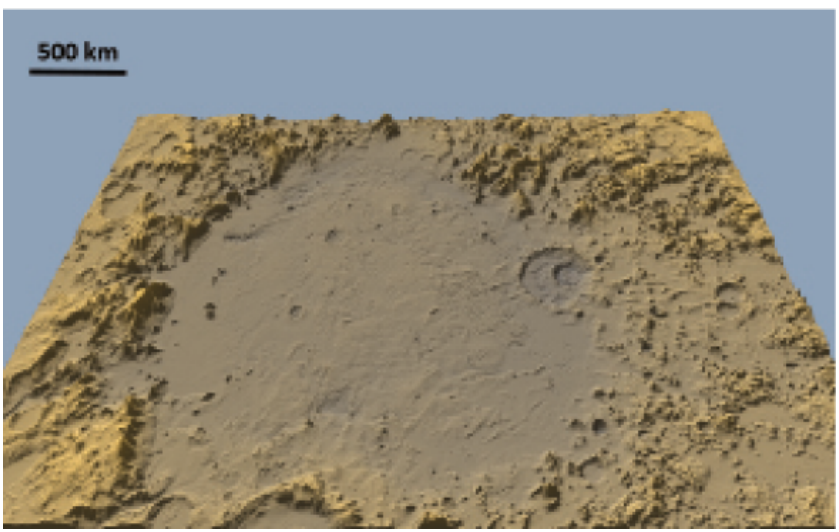
Imagen: NASA/JPL.

48. Argyre Planitia: la segunda cuenca

de impacto más grande de Marte

Argyre Planitia (AP en la figura 6, pág. 27) es una gran cuenca de impacto (→17) situada en las tierras altas del hemisferio sur de Marte. Se trata de la segunda cuenca de impacto más grande y bien conservada de Marte, solo por detrás de la gran cuenca de Hellas Planitia (→32). Se formó por el impacto de un gran meteorito hace unos 3.900 millones de años.

Figura 51



Vista tridimensional de la cuenca de impacto de Argyre.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

Los científicos han señalado esta cuenca como el lugar ideal para mandar futuras misiones robóticas a Marte en busca de vida. Tiene un diámetro de unos 1.700 km, con un relieve relativamente plano en su interior y rodeada por un relieve más escarpado. La cuenca también es un área endorreica con respecto a la topografía circundante, es decir, es la zona más deprimida del entorno y, por consiguiente, si en el pasado hubo condiciones favorables para la presencia de agua líquida, pudo almacenarse en esta cuenca formando un gran lago.

49. Los róveres Spirit y Opportunity

Después del éxito del pequeño róver de la misión Pathfinder (→56), la NASA envió un par de róveres gemelos, el Spirit y el Opportunity, provistos de idéntico instrumental científico, que aterrizaron en lugares opuestos de Marte a comienzos del año 2004. Estos dos róveres pueden ser considerados, con toda propiedad, como dos geólogos robóticos, pues han recorrido varios kilómetros de la superficie de Marte efectuando labores propias de la geología de campo. Estos vehículos encontraron evidencias geológicas, en forma de paleoambientes, de que el planeta había tenido en el pasado condiciones más húmedas y cálidas, favorables para el desarrollo de vida: encontraron rocas y suelos que contenían las claves que demostraban que en el pasado hubo una dinámica del agua (ciclo hidrológico) en la superficie de Marte.

El Spirit aterrizó en el cráter Gusev, que se suponía podía haber contenido un antiguo lago en la gigantesca depresión que forma. Por su parte, el Opportunity aterrizó en la zona de Meridiani Planum, un lugar donde los depósitos minerales sugerían que Marte había sido, en algún momento, un lugar húmedo, en oposición al ambiente seco actual. Al aterrizar, ambos enviaron a la Tierra imágenes panorámicas que fueron interpretadas por los científicos con el objetivo de localizar los lugares con mejor potencial geológico para encontrar evidencias de un Marte húmedo en el pasado. Una vez localizados, los róveres se dirigieron hacia ellos para tomar muestras y realizar pruebas de detalle sobre las rocas y sus afloramientos.

Los róveres han mandado a la Tierra miles de fotografías de alta resolución de la superficie de Marte y sus diferentes espectrómetros han recolectado una ingente base de datos sobre la composición de las rocas y el suelo. Además, los vehículos llevaban equipos para pulir la roca, para quitarles el polvo y la alteración superficial, y así ver y examinar su interior. Opportunity estudió los cráteres Eagle y Endurance, que revelaron evidencia de ambientes de tipo detritico-

salino, con aguas que se evaporaron para formar arenas ricas en sulfatos. Los estudios mostraron cómo estas arenas fueron además retrabajadas por el viento y el agua, se litificaron y llegaron a estar saturadas de agua subterránea. Por su parte, el Spirit encontró un paisaje basáltico en el cráter Gusev, pero después de alcanzar Columbia Hills, verificó que Marte tenía fundamentalmente evidencias de cráteres de impacto, volcanismo explosivo y agua subterránea. También, en Home Plate, el róver descubrió rocas finamente estratificadas de gran interés geológico.

Ambos róveres sobrepasaron con creces el programa de trabajo que tenían previsto realizar. Así, el Spirit estuvo operativo hasta 2010. En 2015 el Opportunity batió el récord de desplazamiento sobre un planeta diferente a la Tierra, acumulando la distancia de un maratón: 42 km. Continuó operativo hasta 2018, tras 15 años de investigaciones sobre el planeta rojo.

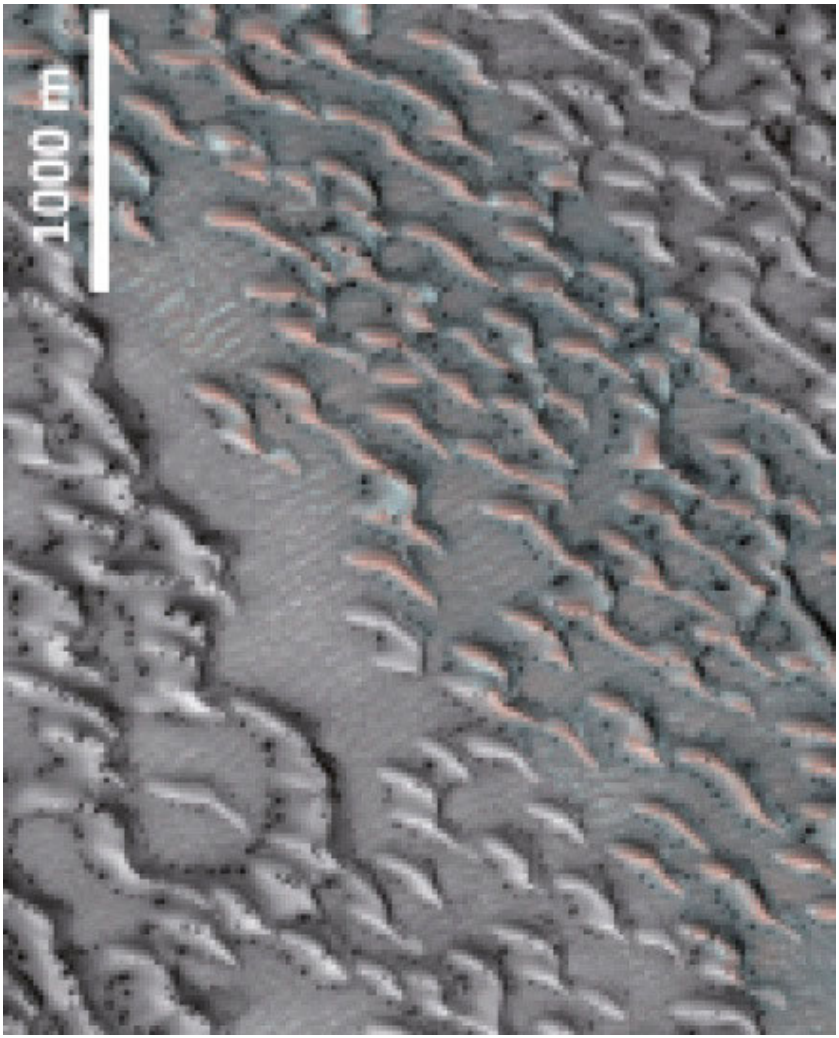
50. DDS-seepages: rezumes

desde puntos oscuros en dunas

Los dark dune spots (DDS) seepages son un tipo de fenómeno que parece indicar la presencia de agua líquida en la actualidad, en determinadas épocas del año, sobre la superficie de Marte. Aparecen en las superficies de deshielo, al final del invierno e inicio de la primavera, en las regiones polares de Marte (figura 52). El hielo está formado fundamentalmente de CO_2 que en el deshielo de la primavera se sublima pasando directamente de sólido a gas, de modo que se produce un incremento relativamente significativo de la presión atmosférica. En las condiciones oportunas, el hielo de agua pasaría a líquido y podrían producirse estas corrientes de rezume de ladera en las dunas. Estas líneas pueden acabar en unos puntos negros que se consideran charcas, donde se acumula el flujo descendente.

Los DDS-seepages se observan muy bien en las pendientes de dunas y en los bordes o en el interior de los cráteres de impacto. Una vez que se ha deshelado la cubierta de CO_2 se visualizan unas líneas oscuras que comienzan en los DDS y que discurren pendiente abajo, y que se han interpretado como producidas por agua líquida, con la consiguiente posibilidad de la presencia de componentes biológicos. Estas características hacen que estas estructuras sean objetivos claros de investigaciones futuras de los róveres que se enviarán a la superficie de Marte.

Figura 52



Hielo translúcido (principalmente de CO2) sobre dunas en una imagen de la cámara HiRISE.

En las dunas que aparecen a la izquierda de la escala pueden verse rayas negras alineadas que son posibles DDS-seepages. La imagen fue tomada a 75 grados de latitud norte.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

51. Análogos terrestres

de la geología de Marte

Si exceptuamos la geomorfología de arañas (→7) formadas por la dinámica del CO_2, todos los rasgos geológicos de Marte tienen su correspondiente análogo terrestre que permite compararlos para su estudio y la mejor comprensión de su funcionamiento. Existen análogos terrestres de los cráteres de impacto, como el cráter Baringer en Arizona. Ahora bien, los grandes cráteres de impacto de meteorito en la Tierra son escasos, ya que han desaparecido por el efecto de la tectónica de placas y de la erosión de la superficie terrestre. Los supervolcanes de Marte tienen su análogo en los volcanes en escudo de las islas Hawái e incluso el Etna en Sicilia se ha propuesto como modelo para el estudio del domo volcánico de Tharsis. El Gran Cañón de Marte, Valles Marineris, no tiene su análogo en el Gran Cañón del Colorado que se generó por incisión fluvial, sino en el Rift Africano, aunque en este caso la similitud es más geométrica que genética, ya que el Rift implica tectónica de placas, lo que no está probado en el caso de Valles Marineris.

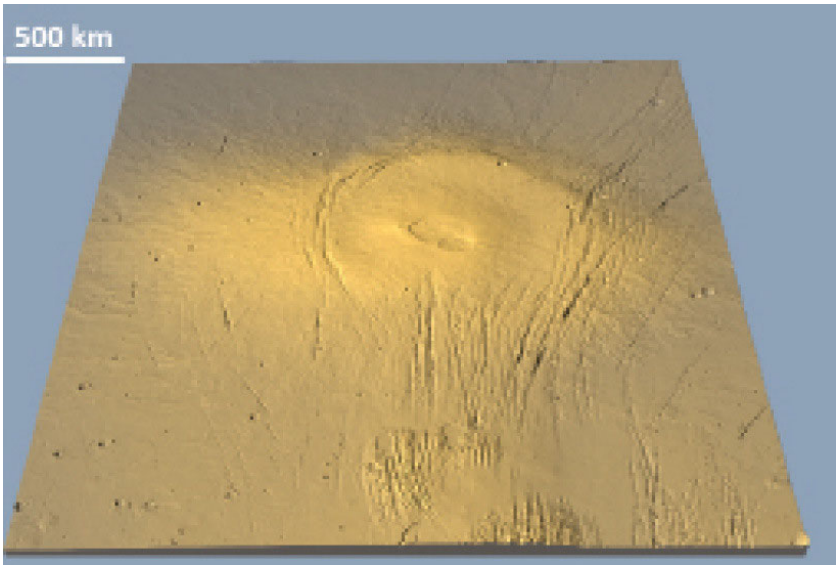
La geomorfología eólica, glaciar y periglaciar de Marte tiene muchos análogos en los mismos tipos geomorfológicos que encontramos en la Tierra. Lo mismo ocurre con la de los deslizamientos o movimientos de grandes masas de tierra por efecto de la gravedad. Curiosamente, las megainundaciones de Marte también tienen su análogo en los Channeled Scablands del estado de Washington en Estados Unidos, unos terrenos desnudos, con la roca erosionada en forma de canales, cuencas y cataratas, así como grandes bloques erráticos, que se formaron por la gigantesca inundación que se provocó al vaciarse de forma catastrófica, en el Pleistoceno, el gran lago glaciar Missoula, en el estado de Montana.

52. Alba Patera: el gigante volcánico

Alba Patera (AA en la figura 6, pág. 27) es el gigante volcánico de Marte en términos de superficie, con 1.200 km de diámetro. Sin embargo, su altitud de 7 km queda muy por debajo de la altura de Olympus Mons (→45), que se considera el mayor volcán de Marte y del sistema solar. Alba Patera forma la parte norte del domo volcánico de Tharsis. Una imagen del volcán, con sus espectaculares fallas y fracturas radiales y concéntricas, se muestra en la figura 53. El volcán también presenta largos flujos de lava, de hasta 300 km, que indican que las emisiones eran de lava muy fluida, de baja viscosidad y muy voluminosas. Estos flujos presentan una morfología con canales sinuosos y discontinuos de lava.

La edad de Alba Patera es más antigua que la de los otros volcanes gigantes del domo de Tharsis y se ha estimado en torno a entre 3.600 y 3.200 millones de años de antigüedad. Su parte central parece ser un volcán en escudo colapsado (figura 53). El conjunto de calderas superpuestas tiene un diámetro de 150 km y presenta signos de subsidencia que indicarían el vaciado de la cámara magmática después de las erupciones. La mayor parte del volcán está cubierto por una capa de polvo de 2 m de espesor, lo que dificulta la investigación de su composición mineralógica a partir de los datos de reflectancia espectral suministrados por las sondas espaciales que orbitan Marte.

Figura 53



Vista tridimensional

del gigantesco volcán Alba Patera y su impresionante sistema de fracturas radiales y concéntricas.

El conjunto de fracturas

del flanco de la derecha

en la imagen se conoce como Tantalus Fossae, mientras que el conjunto

de la izquierda se conoce como Alba Fossae.

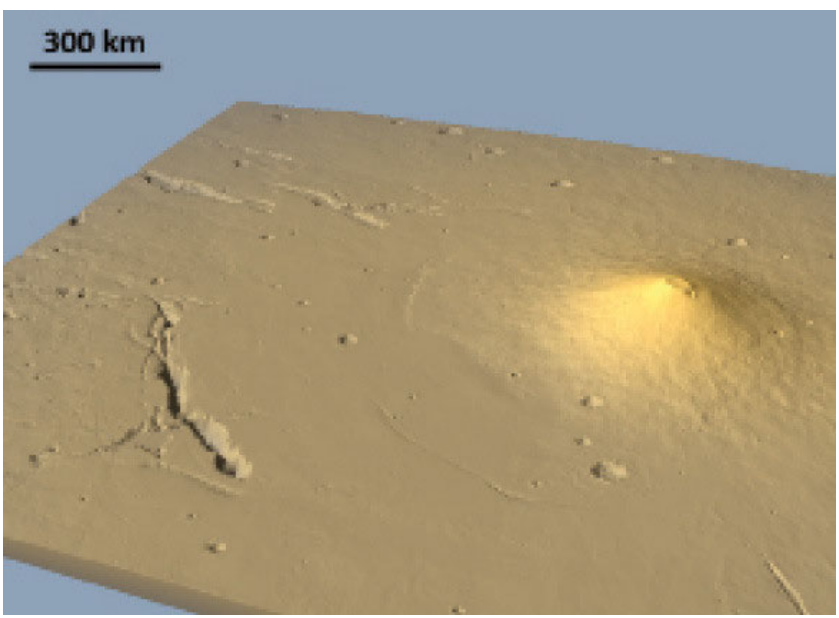
Imagen: Eulogio Pardo

a partir de MOLA y 3DEM.

53. La región volcánica de Elysium

La región volcánica de Elysium (EM en la figura 6, pág. 27) es la segunda provincia volcánica más grande de Marte, solo por detrás del gigantesco domo volcánico de Tharsis. El principal volcán de la provincia es el supervolcán Elysium Mons, que se puede ver en la figura 54.

Figura 54



Vista tridimensional de Elysium Mons, en la parte derecha, y de la gran fosa Elysium Chasma, en la izquierda. En la parte superior se puede ver el sistema de fosas radiales Elysium Fossae. Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

Elysium Mons tiene una altitud de 14 km, lo que lo convierte en el tercero más alto de Marte. La pendiente de sus flancos se incrementa conforme aumenta la altitud y llega a ser de 7 grados. El diámetro del volcán se ha estimado en 375 km, aunque los flujos de lava se extienden regionalmente muchos más. En la figura 56 (pág. 123) se puede ver cómo el volcán conecta con una gran meseta a su izquierda, que está limitada por una gigantesca fractura que conforma la fosa llamada Elysium Chasma, dispuesta de modo concéntrico respecto al volcán, a diferencia de las Elysium Fossae, que se disponen de modo radial en relación con el mismo. En la provincia hay otros dos volcanes menores: en la parte noreste, Hecates Tholus, y en la parte sureste, Albor Tholus.

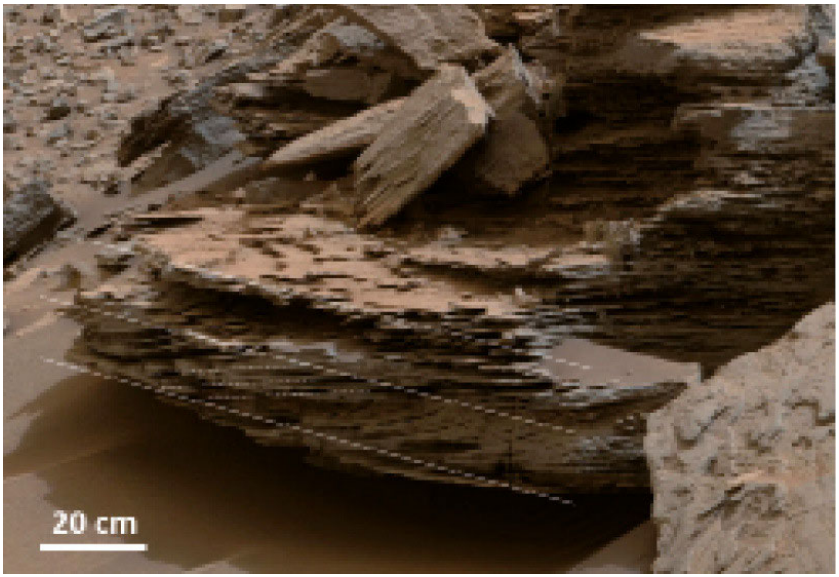
54. Rocas con estratificación cruzada:

¿prueba de un flujo de agua?

La estratificación cruzada, como la que se puede ver en la base de la roca que aparece en la figura 55, consiste en una disposición geométrica inclinada de las láminas de sedimento en el interior de un estrato (líneas blancas discontinuas) con respecto al plano de estratificación principal (líneas blancas continuas). Se forma por la deposición de las partículas sobre superficies inclinadas —como, por ejemplo, las dunas o el fondo marino ondulado—, indicando un ambiente sedimentario en el que había un fluido en movimiento y que típicamente es el agua o el viento. La dirección en la cual las láminas internas están inclinadas indica la dirección del transporte de sedimento; esto es, indica la dirección de la paleocorriente.

La estratificación cruzada se puede formar en cualquier situación en la que un fluido (agua o viento) se mueve sobre una capa de sedimento con material granular que puede ser transportado por dicho fluido. Por consiguiente, la estratificación cruzada podría indicar el flujo de agua de un arroyo, un río, la marea o una corriente marina, o también podría generarse por el viento, en el caso de las dunas eólicas. En el caso de la figura 55, los científicos han determinado que parece tratarse de sedimentos arrastrados por agua y depositados en un ambiente deltaico (→ 10).

Figura 55



La fotografía, tomada

por la Mast Camera (Mastcam) del róver Curiosity, muestra estratificación cruzada en areniscas, la cual es una evidencia de un flujo de agua tractivo que arrastra sedimento, posiblemente en un ambiente deltaico.

Imagen: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

55. Líneas recurrentes en laderas (RSL):

¿flujos estacionales de agua líquida?

Se han observado líneas oscuras en las laderas del cráter Hale que sugieren flujos de agua líquida en determinadas épocas del año. Observadas de cerca (figura 56), se ven cárcavas que han debido ser excavadas por un flujo de agua líquida. Estas cárcavas se han estudiado con detenimiento a lo largo de varios años y se han observado cambios en alguna de ellas, lo que podría ser indicativo de flujos actuales de agua líquida en determinadas épocas del año. Por otra parte, las llamadas “líneas recurrentes en laderas” (RSL) se muestran en la figura 57.

Figura 56

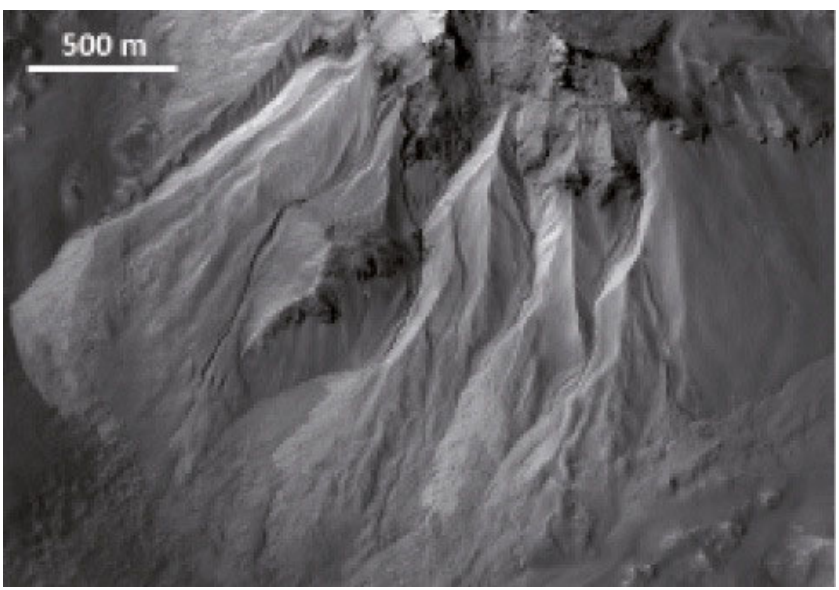


Imagen de alta resolución de la cámara HiRISE que muestra cárcavas

en los bordes del cráter Hale. Se observan los canales en las laderas donde

el flujo discurre desde arriba (en la parte superior de la imagen) hacia abajo.

En la parte inferior, el material arrastrado se acumula formando un depósito

con forma de abanico.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

El análisis morfométrico permite determinar cómo todos los flujos acaban con aproximadamente la misma pendiente, similar al ángulo de reposo de la arena. Las RSL se encuentran sobre todo en las laderas rocosas con fuerte pendiente, tales como las de los cráteres en latitudes medias del sur; en Valles Marineris, que está cerca del ecuador; y en Acidalia Planitia, en las llanuras del norte del planeta. Todavía no está completamente claro cómo se forman. En muchos casos se confunden con pequeñas avalanchas de material granular como polvo y arena, por lo que las verdaderas RSL parecen no ser tan frecuentes e indicarían que, en la actualidad, el volumen de agua líquida en Marte es muy limitado.

Figura 57

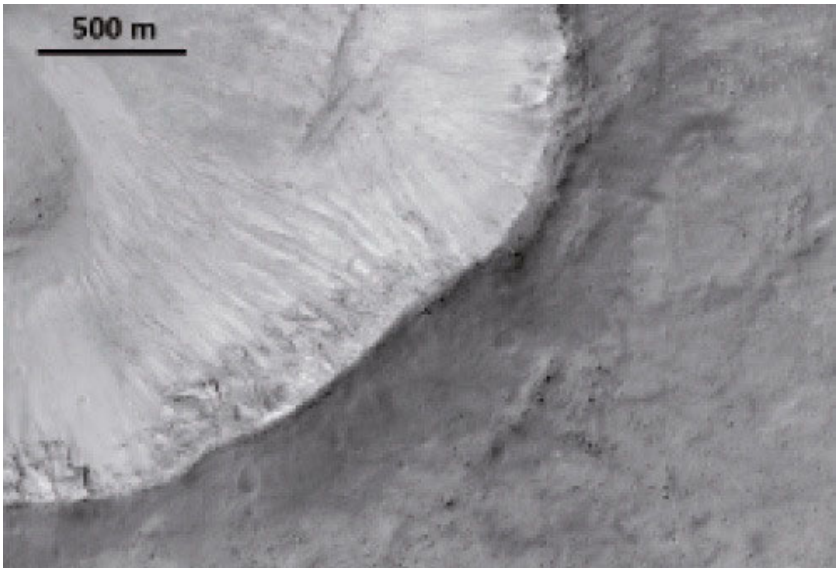


Imagen de alta resolución de la cámara HiRISE que muestra líneas recurrentes

en laderas (RSL) en el cráter Tivat. Las líneas oscuras, que parecen indicar posibles

flujos estacionales, se muestran en la ladera interior del cráter.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

56. La sonda Mars Pathfinder

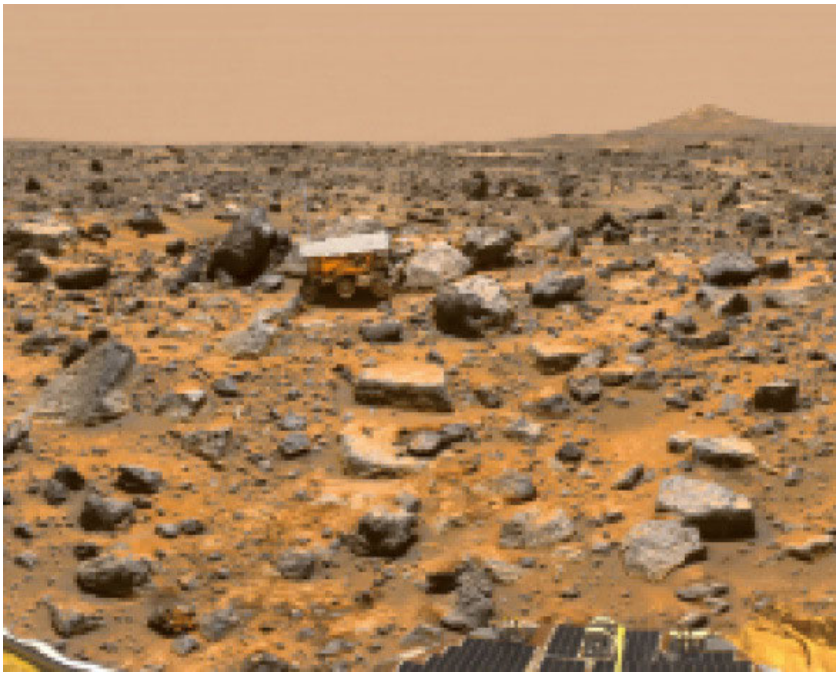
y el primer róver sobre Marte: el Sojourner

La sonda espacial Mars Pathfinder se lanzó el 4 de diciembre de 1996 y aterrizó en Marte el 4 de julio de 1997, en la zona de Ares Vallis. Esta misión era básicamente una prueba que iba a marcar la futura investigación en Marte, que utilizaba vehículos robotizados que se moviesen sobre la superficie del planeta tomando fotografías, muestras y realizando análisis. El aterrizador de la Pathfinder transportó por primera vez un róver de casi 11 kg, el Sojourner, a la superficie de Marte. Tanto el aterrizador como el róver transportaban instrumental científico para estudiar la geología, el clima y la atmósfera de Marte. Ambos enviaron fotografías y análisis químicos que mostraron que la superficie de Marte fue en algún momento templada y húmeda.

La figura 58 muestra el róver Sojourner al poco tiempo del aterrizaje, en un área que geomorfológicamente es una llanura de inundación y que muestra multitud de bloques de roca angulosos y otros más redondeados. Estos bloques fueron arrastrados por una gran inundación (→9) y depositados en esta zona de Ares Vallis. El Pathfider y el Sojourner fueron todo un éxito para el programa NASA Discovery, ya que demostraron que se podían hacer misiones de bajo coste que estuvieran enfocadas a objetivos científicos muy específicos. Durante los tres meses que estuvo en operación, la misión envió a la Tierra 2,6 gigabits de datos, incluyendo 16.000 fotografías que tomó el aterrizador, 550 imágenes realizadas por el Sojourner y 8,5 millones de datos ambientales de temperatura, presión y velocidad del viento procedentes de diversos sensores. Aunque esta cantidad de información ha sido sobrepasada con creces durante las misiones siguientes, representó un hito para la época, teniendo en cuenta, además, que la Pathfinder significaba poner una nueva sonda en Marte después de 20 años que habían pasado desde las Viking y tras el fracaso de la sonda Mars Observer, cuyo contacto se perdió al poco de que se posicionase en la órbita

de Marte.

Figura 58



La imagen muestra el área de Ares Vallis donde aterrizó la Pathfinder (que aparece

en la parte inferior) y en el centro se observa el primer róver que rodó sobre la superficie

de Marte: el Sojourner. Puede observarse cómo el róver es del mismo tamaño

que muchas de las rocas que ha de sortear en su camino. La zona se ha llamado,

muy apropiadamente, Rock Garden.

Imagen: NASA/JPL.

57. El ‘efecto antípodas’

de los grandes cráteres de impacto

El impacto de un gran meteorito, además de un gran cráter de impacto, genera una energía sísmica que, en último término, se focaliza en las antípodas del lugar en el que haya tenido lugar. Recordemos que las antípodas estarían justamente en el lugar opuesto del planeta si se trazase una línea recta que pasara por su centro y que uniese el lugar del impacto y su extremo opuesto. Pues bien, en las antípodas del lugar de impacto, la focalización de las ondas sísmicas produciría una fracturación de la corteza que generaría conductos por los que podrían salir grandes cantidades de lava, generando regiones volcánicas. De este modo, en las antípodas de las cuencas de impacto de Hellas, Isidis y Argire debería haber volcanes. Alba Patera (→52) está en las antípodas de la cuenca de impacto de Hellas. Las presiones originadas por el impacto que creó la cuenca de Isidis fueron mucho menores y no habrían producido una disrupción del terreno en las antípodas, aunque sí que hay fracturas radiales en Noctis Labyrinthus, que se podrían haber generado por el impacto de Isidis. Por otra parte, en las antípodas de Argyre no hay evidencia de volcanismo, ya sea porque las presiones no fueron suficientes o porque los terrenos pudieron haberse modificado con posterioridad.

58. Depósitos lacustres en Marte:

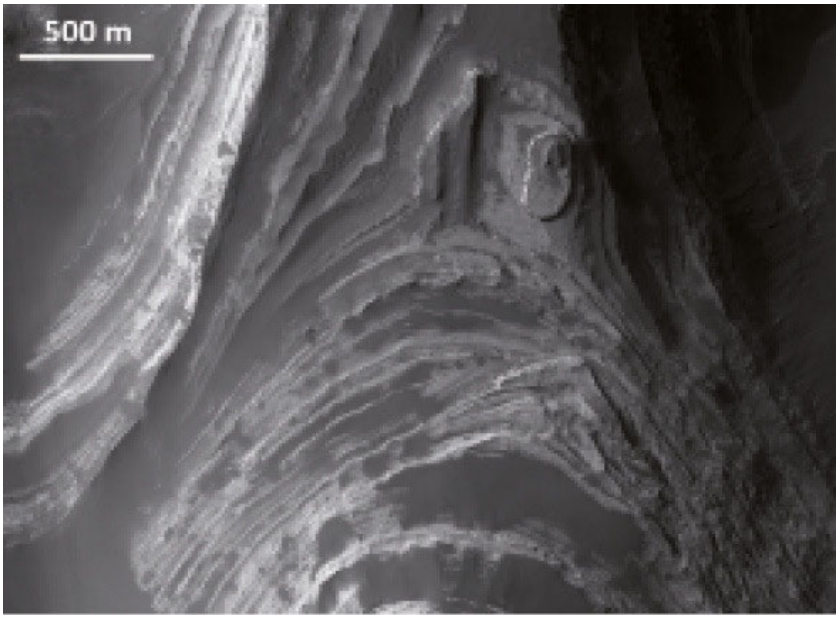
reminiscencias de paleolagos

En un tiempo remoto, hace unos 3.700 millones de años, sobre la superficie de Marte existieron paleolagos. Los investigadores en geología planetaria han encontrado un gran número de localizaciones de dichos paleolagos en regiones deprimidas que forman cuencas abiertas, con canales de drenaje de entrada y uno de salida que drenaba el lago. Los cráteres de impacto, por ejemplo, proporcionan una geometría adecuada para su formación. Los lagos en cuencas abiertas implican que su nivel ha debido de ser estable hasta la cota del canal de salida. Esto es muy interesante, ya que implica la presencia de una actividad fluvial persistente durante cierto tiempo sobre la superficie del planeta. En particular, parece que casi toda la actividad fluvial cesó cerca del límite entre las eras Noéica y Hespérica (→42). Ello supone que estos sistemas lacustres han estado 3.700 millones de años sin actividad fluvial que los alimentara y sujetos a la acción de otros procesos geológicos. Uno de esos procesos modificadores más frecuentes es el revestimiento de los paleolagos por eventos volcánicos, de modo que se encuentran recubiertos por una colada de lava. En otras ocasiones, los depósitos lacustres han sido exhumados por procesos glaciares.

En cuanto a la composición mineralógica de los afloramientos de los depósitos lacustres, utilizando datos de la firma espectral se observa que, a diferencia de los depósitos lacustres análogos terrestres, escasean los minerales de alteración acuosa, así como los evaporíticos. Esto podría deberse a varios motivos, uno de los cuales es que los depósitos lacustres detríticos no se hayan alterado, lo que podría implicar que el periodo de actividad lacustre no duró mucho tiempo; aunque también cabe la posibilidad de que hayan existido problemas en la identificación espectral de dichas mineralogías. Se han identificado afloramientos de depósitos bandeados (figura 59) en estos paleolagos y su identificación como depósitos lacustres se hace descartando que el bandeado sea de

origen glaciar, volcánico o eólico, para lo que se utilizan las herramientas que proporciona la geología.

Figura 59



Esta imagen muestra una secuencia de rocas estratificadas de origen lacustre dentro

del cráter Terby. La secuencia completa tiene un espesor de unos 2 km y los estratos

muestran una buena continuidad lateral, de modo que un mismo nivel puede seguirse

a lo largo de muchos kilómetros. Imagen de alta resolución de la cámara HiRISE.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

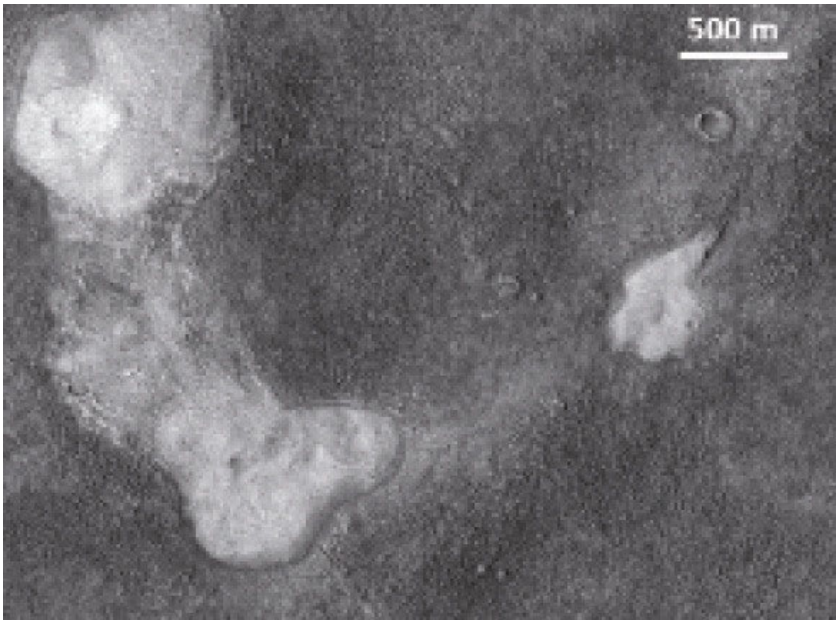
59. Conos de tamaño kilométrico:

¿volcanes de lodo en Marte?

Los volcanes de lodo son estructuras geológicas que se parecen morfológicamente a los volcanes magmáticos. Estas estructuras actúan como vías preferentes para que un fluido profundo, pero no de origen ígneo, se focalice y pueda alcanzar la superficie. Eventualmente pueden producir erupciones que emiten una brecha de lodo con una mezcla de agua, gas, barro y fragmentos de roca. En la Tierra, el mecanismo principal de generación de los volcanes de lodo es el gas metano a sobrepresión que asciende desde rocas fuente o yacimientos de hidrocarburos situados a gran profundidad. En Marte se han encontrado las morfologías propias del volcanismo de lodo, aunque también podrían ser explicadas por volcanismo ígneo de pequeña escala. Las implicaciones, de uno u otro origen, son muy diferentes. El volcanismo ígneo implicaría, por el lugar en el que se ha encontrado, que Marte también tiene actividad volcánica lejos de los grandes centros volcánicos de Tharsis (→26) y Elysium (→53), mientras que un volcanismo de lodo implica una actividad y movilidad de agua subterránea a sobrepresión en el pasado. Es común, en ambos orígenes, la existencia de pequeños conos con flancos inclinados y cráteres centrales en sus partes somitales. Por ello, es difícil distinguir su origen exclusivamente a partir de sus rasgos geomorfológicos. Por otra parte, el volcanismo de lodo requiere de grandes centros de deposición sedimentaria como pueden ser las llanuras del norte de Marte, como ocurre en Chryse Planitia. Se cree que estos volcanes de lodo se han formado por las altas presiones hidráulicas que puede alcanzar una hidrosfera subterránea confinada por una criosfera en las partes más superficiales. Por consiguiente, hay un exceso de presión en los acuíferos confinados que produce fracturación hidráulica de la propia hidrosfera y de la criosfera suprayacente. La circulación de fluido a través de estas fracturas puede acarrear su mezcla con sedimento, llegando a alcanzar la superficie produciendo estos volcanes de lodo.

Los volcanes de lodo tienen, además, otro interés en relación con la vida en Marte: acarrean a la superficie, desde las profundidades del subsuelo, sedimento que podría contener materiales orgánicos susceptibles de arrojar luz sobre la posible vida microbiana, pasada o actual, en Marte. Es por ello que son un objetivo científico prioritario para futuras misiones robóticas al planeta.

Figura 60



Volcanes de lodo en Acidalia Planitia. Imagen de alta resolución de la cámara HiRISE.

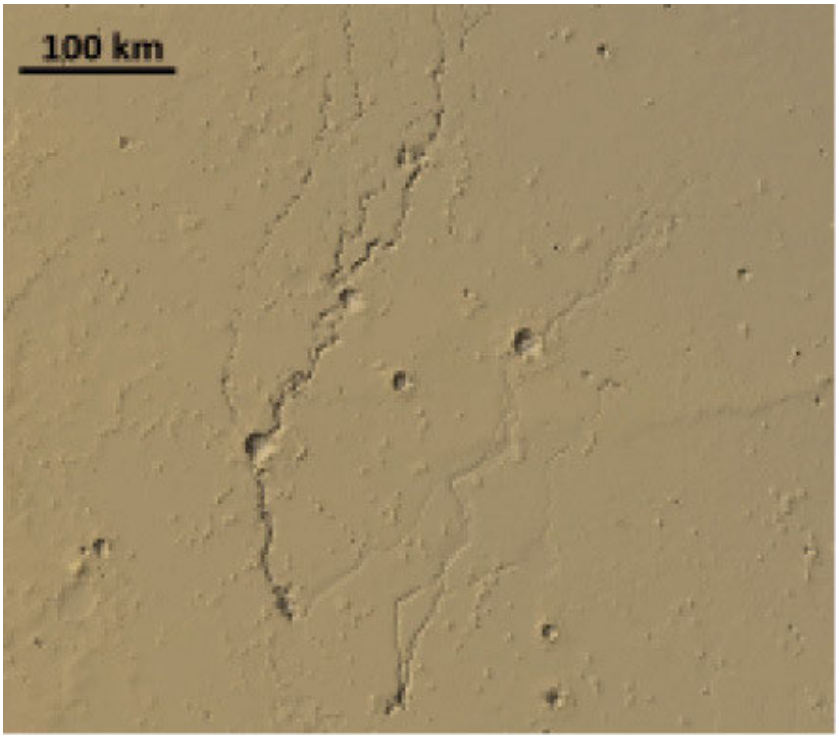
Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

60. ¿Existen sistemas de cavernas

en las llanuras del norte de Marte?

Durante los últimos 3.500 millones de años, la hidrosfera de Marte ha estado restringida a su subsuelo, formando acuíferos confinados por capas de permafrost (→21). Es también conocido que eventualmente se produjeron gigantescas inundaciones localizadas en la periferia del domo de Tharsis, así como en relación con la apertura de la fosa de Valles Marineris, que dejaron cicatrices en el paisaje que revelan la magnitud de dichos desbordamientos en forma de impresionantes canales de descarga (→9).

Figura 61



Canales y depresiones a gran escala en Hebrus Valles. Se observa cómo

los canales acaban en depresiones del terreno que pueden conducir

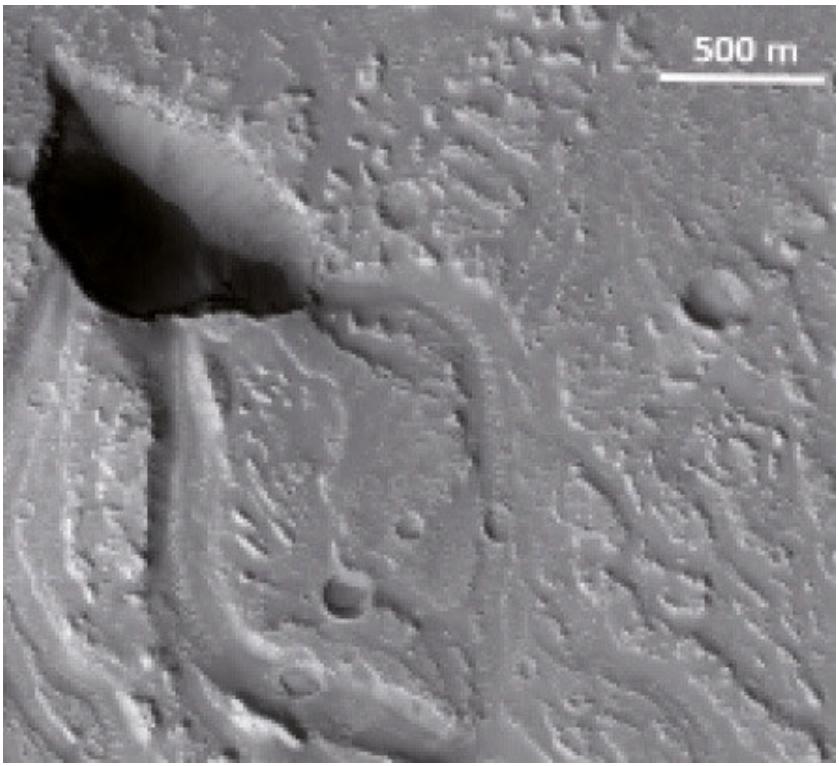
a un sistema subterráneo de cavernas.

Imagen: Eulogio Pardo a partir de MOLA y 3DEM.

La cuestión es, ¿dónde fueron a parar los increíbles volúmenes de agua de esas descargas? En general, la evidencia geomorfológica que podría existir en la parte terminal de estos canales ha sido borrada o está cubierta por otro material. Sin embargo, un grupo de investigadores norteamericanos ha encontrado una posible solución. Sus resultados indican que los canales de descarga de Hebrus Valles terminan en una zona de fracturas y depresiones (figuras 61 y 62)

en las llanuras del norte de Marte (→20). De este modo, parece que dicho flujo fue reabsorbido por el subsuelo, por un sistema de cavernas subterráneas existentes en esa zona de fracturas y depresiones.

Figura 62



Canales y depresión de pequeña escala en Hebrus Valles.

Imagen de alta resolución de la cámara HiRISE.

Imagen: NASA/JPL/University of Arizona.

La principal hipótesis de los investigadores es que la evacuación de

material del subsuelo por volcanismo de lodo (→59) fue determinante en la formación de las cavernas. Estas componen un pseudokarst, ya que no están formadas en rocas carbonatadas ni en ningún otro tipo de rocas solubles. Por ello, se ha propuesto un mecanismo de formación que involucra el fenómeno denominado “volcanismo de lodo”. Este se debe a la existencia de sobrepresiones hidráulicas en los acuíferos confinados que en la superficie han formado domos volcánicos que se cree que son volcanes de lodo consecuencia del empuje desde el subsuelo y la eyección del material hacia el exterior.

61. El futuro de la investigación geológica

en Marte. Objetivo: colonizar el planeta

Ningún ser humano ha estado todavía en Marte, por lo que ningún geólogo ha podido tomar datos sobre el terreno. Toda la investigación geológica se ha realizado a distancia, una especie de telegeología donde ha sido fundamental la información enviada por las sondas espaciales, los aterrizadores que se han posado sobre su superficie y los róveres que han circulado sobre el terreno. Esta información consta de imágenes, datos geofísicos y análisis geoquímicos en una cantidad sin precedentes en la investigación de otro planeta diferente al nuestro. La información que se ha ido acumulando es ingente y mucha más llegará en el futuro con el envío de nuevas misiones de orbitadores, aterrizadores y róveres. En la actualidad, las misiones activas en Marte son, de más reciente a más antigua, la InSight, ExoMars, MAVEN, Mars Orbiter Mission (MOM), Curiosity, Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), Mars Express y 2001 Mars Odyssey.

InSight (→30) (NASA) es un aterrizador con muchos instrumentos geofísicos. ExoMars, de la Agencia Espacial Europea (ESA), consiste en un orbitador (Trace Gas Orbiter) que estudia el metano y otros gases traza en la atmósfera que pudiesen sugerir indicios de actividad biológica o procesos geológicos. MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) (NASA) efectúa medidas para estudiar la dinámica de las capas altas de la atmósfera de Marte y su ionosfera. Mars Orbiter Mission es una sonda espacial en la órbita de Marte que representa la primera que la India manda al espacio, fundamentalmente como una prueba tecnológica de la industria aeroespacial de dicho país. Curiosity (→34) (NASA) representa la última generación de róveres que está sobre la superficie de Marte tomando fotografías, muestras y medidas geoquímicas y geofísicas. Mars Reconnaissance Orbiter (NASA) lleva a bordo la cámara (HiRISE) y el espectrorradiómetro más potentes enviados hasta la fecha a Marte. Mars Express (ESA) es un

orbitador que ha proporcionado impresionantes fotografías de la superficie de Marte y ha detectado sorprendentes concentraciones de metano en el planeta. 2001 Mars Odyssey (NASA) es un orbitador que toma las mejores fotografías en longitudes de onda del infrarrojo térmico, lo que permite observar el planeta durante el día y la noche para la inferencia de su dinámica térmica.

Hay varias misiones planeadas para los próximos años con el envío de nuevos orbitadores, aterrizadores y róveres con nuevos instrumentos científicos que tomarán más y mejores datos. Sin embargo, siempre faltará la información complementaria que proporcionan la toma y análisis de muestras y la cartografía y estudios geológicos sobre el terreno. Ello se conseguirá en las futuras misiones tripuladas a Marte, que son necesarias si algún día se piensa en comenzar su colonización. ¿Quién será el primer geólogo en pisar Marte? Quizás usted, querido lector o querida lectora.

Bibliografía

Aharonson, O.; Zuber, M. T.; Rothman, D. H.; Schorghofer N. y Whipple, K. X. (2002): “Drainage basins and channel incision on Mars”, PNAS, 99, pp. 1780-1783.

Balme, M. R., Bargery, A. S., Gallagher, C. J. y Gupta, S. (eds.) (2015): Martian Geomorphology, Geological Society of London, Special Publications, p. 356.

Barlow, N. G. (2010): “What we know about Mars from its impact craters”, Geological Society of America Bulletin, 122, pp. 644-657.

Carr, M. H. y Garvin, J. (2001): “Mars exploration”, Nature, 412, pp. 250-253.

Christiansen, E. H. (2002): “Lahars in the Elysium region of Mars”, Geology, 17, pp. 203-206.

Costard, F.; Forget, F.; Mangold, N. y Peulvast, J. P. (2002): “Formation of Recent Martian Debris Flows by Melting of Near-Surface Ground Ice at High Obliquity”, Science, 295, pp. 110-113.

Cushing, G. E. (2012): “Candidate cave entrances on Mars", Journal of Cave and Karst Studies, 74, pp. 33-47.

DiBiase, R.A.; Limaye, A. B.; Scheingross, J. S.; Fischer, W. W. y Lamb, M. P. (2013): “Deltaic deposits at Aeolis Dorsa: Sedimentary evidence for a standing body of water on the northern plains of Mars”, Journal of Geophysical Research: Planets, 118, pp. 1285-1302.

Garvin, J. B.; Sakimoto, S. E. H.; Frawley, J. J.; Schnetzler, C. C. y Wright, H. M. (2000): “Topographic evidence for geologically recent near-polar volcanism on Mars”, Icarus, 145, pp. 648-652.

Hiesinger, H. y Head III, J. W. (2000): “Characteristics and origin of

polygonal terrain in southern Utopia Planitia, Mars: Results from Mars Orbiter Laser Altimeter and Mars Orbiter Camera data", Journal of Geophysical Research, 105, pp. 11999-12022.

Hynek, B. M. y Phillips, R. J. (2001): "Evidence for extensive denudation of the Martian highlands", Geology, 29, pp. 407- 410.

Hynek, B. M.: Robbins, S. J.; Srámek, O. y Zhong, S. J. (2011): "Geological evidence for a migrating Tharsis plume on early Mars", Earth and Planetary Science Letters, 310, pp. 327-333.

Kleinhans, M. G. (2010): "A tale of two planets: geomorphology applied to Mars' surface, fluvio-deltaic processes and landforms", Earth Surface Processes and Landforms, 35, pp. 102-117.

Lewis, K. W. y Aharonson, O. (2014): "Occurrence and origin of rhythmic sedimentary rocks on Mars", Journal Geophysical Research: Planets, 119, pp. 1432-1457.

Malin, M. C. y Edgett, K. S. (2000): "Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars", Science, 288, pp. 2330-2335.

McMahon, S.; Bosak, T.; Grotzinger, J. P.; Miliken, R. E.; Summons, R. E.; Daye, M.; Newman, S. A.; Fraeman, A.; Williford, K. H. y Briggs, D. E. G. (2018): "A field guide to finding fossils on Mars", Journal of Geophysical Research: Planets, 123, pp. 1012-1040.

Oehler, D. Z. y Allen, C. C. (2010): "Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars", Icarus, 208, pp. 636-657.

Pardo-Igúzquiza, E. (2019): "Aprendiendo geología mediante la interacción con los datos topográficos de Mars Global Surveyor (NASA) a través del programa 3DEM", Enseñanza de Ciencias de la Tierra, 27 (2), pp. 165-173.

Schorghofer, N.; Aharonson, O.; Gerstell, M. F. y Tatsumi, L. (2007): "Three decades of slope streak activity on Mars", Icarus, 191, pp. 132-140.

Plescia, J. B. (2004): "Morphometric properties of Martian volcanoes", Journal of Geophysical Research, 109, E03003, pp.

1-26.

Tanaka, K. y Leonard, G. (1995): “Geology and landscape evolution of the Hellas region of Mars”, Journal of Geophysical Research, 100, pp. 5407–5432.